

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de *Génie Electrique*

*Département d'Électrotechnique*

Thèse présentée par :

**KADOUS Nezha**

Pour l'obtention du diplôme de :

**Doctorat Es-Sciences en Électrotechnique**

Option : Haute tension

Intitulé de la thèse :

**Modélisation numérique et expérimentale de la précipitation  
électrostatique des particules de fumée de taille micronique**

Présentée devant le jury composé de :

Président :	Pr. KHATIR Mohamed	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
Directeur de thèse :	Pr. TILMATINE Amar	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
Examineurs :	Pr. HENNAD Ali	Professeur	USTMB Oran
	Pr. RIZOUGA Mohamed	Professeur	USTMB Oran
	Pr. OUIDDIR Rabah	Professeur	USTMB Oran
	Dr. NEMMICH Said	MCA	Université de Sidi Bel Abbès

Soutenu en: Janvier 2022

*À la mémoire de mes très très  
Chers parents ...*

## *Remerciements*

La réalisation de ce travail de recherche a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude :

Je souhaite avant tout remercier mon directeur de thèse Monsieur le professeur Amar Tilmatine, pour les conseils judicieux qu'il n'a cessé de me donner avec beaucoup de patience et surtout le soutien moral dont j'ai toujours bénéficié auprès de lui. Aucun mot ne saurait traduire ma gratitude et mon profond respect pour celui qui a été pendant ces longues années mon guide, mon conseiller et même plus...il a dirigé mon travail de thèse et m'a énormément apporté sans se lasser. Sans lui cette thèse n'aurait jamais vu le jour. Encore une fois merci.

Monsieur Pierre ATTEN, Directeur de recherche au laboratoire G2ELab au CNRS de Grenoble, qui m'a accueilli au sein de son laboratoire de recherche en mettant à ma disposition tout le matériel nécessaire pour mener à bien mes recherches. Je le remercie surtout pour son esprit toujours critique et intransigeant qui m'a permis d'éclaircir les points obscurs de ce thème de recherche.

Je remercie tous les membres de notre laboratoire APELEC . Je n'oublierai jamais tous les moyens de confort et de convivialité qui m'ont apportés dans une ambiance de grande confiance et d'amitié. Je tiens plus particulièrement à exprimer ma reconnaissance envers la gentille et souriante Aicha qui n'a cessé de témoigner tout son soutien et son amour à tout le monde.

Je n'oublierai pas de remercier tous mes chers collègues de l'université de Mascara ; qui m'ont toujours poussé à aller vers l'avant. Je cite en particulier mon ami et frère Kherbouche Fouad pour son aide précieuse.

Je remercie l'ensemble de jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail de recherche à commencer par le président de jury, le professeur Khatir Mohamed , puis les honorables professeurs : Pr. HENNAD Ali, Pr. RIZOUGA Mohamed, Pr. OUIDDIR Rabah et le Dr. NEMMICH Said.

J'ai laissé en dernier les personnes les plus chers à mon cœur, tous les membres de ma famille que j'ai tracassée pendant ces longues années et qui étaient là pour moi dans les moments les plus difficiles. Je cite en particulier mon exemple, ma source d'inspiration, celle qui m'a donné toute l'énergie positive dont j'avais besoin Madame Kadous Kheira, qu'elle trouve ici l'expression de mon éternelle reconnaissance.



---

## Sommaire

Sommaire .....	i
Liste des figures.....	vii
Introduction générale .....	1

### Chapitre I

#### État de l'art sur les précipitateurs électrostatiques

I.1. Introduction .....	3
I.2. Problématique de la pollution de l'air .....	3
I.2.1. Mode d'émission des particules et leurs sources.....	4
I.2.1.1. Particules primaires issues du mode d'émission directe .....	5
I.2.1.2. Particules secondaires issues de mode d'émission indirecte .....	5
I.2.2. Granulométrie des particules .....	6
I.2.3. Effets des particules .....	6
I.2.3.1. Effets sur la santé de l'être humain.....	6
I.2.3.2. Effets sur l'environnement .....	8
I.2.3.3. Effets sur le climat .....	8
I.3. Techniques d'épuration des gaz pollués .....	9
I.3.1. Techniques classiques pour la dépollution des gaz .....	9
I.3.2. Technique de dépollution par précipitation électrostatique.....	10
I.4. Les précipitateurs électrostatiques (électrofiltres).....	10
I.4.1. Aspect historique .....	10
I.4.2. Définition.....	10
I.4.3. Principe de fonctionnement .....	11
I.4.3.1 Phase de chargement électrique des particules .....	11
I.4.3.2 Phase de collecte des particules chargées .....	11
I.4.3.3 Phase de récupération des particules collectées.....	11
I.4.4. Migration des particules chargées .....	13
I.4.4.1. Force de Coulomb .....	13
I.4.4.2. Force diélectrophorétique .....	14

---

I.4.5. Mécanismes de charge des particules .....	14
I.4.5.1. Charge par champ .....	15
I.4.5.2. Charge par diffusion .....	17
I.4.5.3. Charge mixte.....	17
I.4.6. Vitesse de migration des particules chargées .....	18
I.5. Collecte des particules .....	23
I.5.1. Paramètres influençant l'efficacité de collecte .....	23
I.5.1.1. Contre émission .....	23
I.5.1.2. Réentraînement .....	24
I.5.1.3. Effets électro hydrodynamiques .....	24
I.6. Limites des électrofiltres à décharge couronne.....	25
I.7. Décharge Couronne .....	25
I.7.1. Historique .....	25
I.7.2. Définition.....	26
I.7.3. Principe de la décharge couronne .....	27
I.7.4. Modes de décharge par effet couronne .....	27
I.7.4.1. Polarité négative .....	27
I.7.4.2. Polarité positive .....	28
I.7.5. Champ critique de la décharge couronne.....	28
I.8. Modèles des précipitateurs électrostatiques selon leurs architectures .....	29
1.8.1. Précipitateurs secs .....	29
1.8.1.1. Précipitateurs à un seul étage .....	30
1.8.1.2. Précipitateurs à double étage .....	30
1.8.2. Précipitateurs humides .....	31
I.9. Modèles des précipitateurs électrostatiques suivant leurs fonctionnements.....	32
I.9.1. Modèle laminaire .....	32
I.9.2. Modèle de Deutsch .....	33
I.10. Nouvelles technologies des précipitateurs.....	34
I.10.1. Précipitateur à barrière diélectrique (DBD).....	34
I.10.2. Electrofiltres à électrode mobile .....	35
I.10.3. Dépoussiéreur électrostatique type tube rotatif .....	35

---

I.10.4. Précipitateur hélicoïdale .....	35
I.10.5. Nouveaux précipitateurs a courant continue.....	36
I.10.5.1. Précipitateur fil-plaque .....	36
I.10.5.2. Précipitateur à fils attachés aux plaques diélectriques.....	36
I.10.5.3. Précipitateur fil-à-cylindre.....	36
I.10.5.4. Précipitateur à plaque perforé.....	36
I.11. Conclusion .....	36

## Chapitre II

### Matériel et Méthodes

II. 1. Introduction .....	38
II. 2. Description du banc d'essai « pilote 1 ».....	38
II.2.1. Description du précipitateur électrostatique.....	40
II.2.1.1. Parties isolantes .....	40
II.2.1.2. Electrodes collectrices .....	41
II.2.1.3. Assemblage .....	42
II.2.2. Equipements utilisés.....	42
II.2.2.1. Filtre mécanique (cyclone).....	43
II.2.2.2. Cage de Faraday .....	44
II.2.3 Echantillons de particules.....	44
II.2.4 Description de la procédure expérimentale .....	46
Phase 1 : Préparation des expériences.....	46
Phase 2 : Préparation de l'échantillon de particules .....	46
Phase 3 : Déroulement des essais expérimentaux .....	46
Phase 4 : Protocole de mesure .....	47
Phase 5 : Compléments des essais .....	47
II. 3. Description du banc d'essai « pilote 2 ».....	47
II.3.1. Description du précipitateur électrostatique.....	49
II.3.2. Equipements utilisés.....	51
II.3.2.1. Ballon de stockage.....	51
II.3.2.2. Générateur de fumée (ou fluide) .....	51
II.3.2.3. Appareil d'injection de la poudre (cendres, calcite).....	52

II.3.2.4. Conduite de tranquillisation des particules .....	53
II.3.2.5. Chambre de collecte et Nid d'abeille .....	53
II.3.2.6. Granulomètre Laser pour Aérosol .....	54
II.3.3 Echantillon de particules .....	56
II.3.3.1. Fumées de cigarettes .....	56
II.3.3.2. Calcite.....	56
II.3.3.3. Encens .....	57
II.3.3.4. Cendres .....	58
II.3.4 Procédure expérimentale .....	58
II.3.4.1. Fumée de cigarettes .....	58
Phase 1 : Préparation des expériences.....	58
Phase 2: Préparation de l'échantillon de particules .....	59
Phase 3: Déroulement des tests expérimentaux .....	59
Phase 4 : Protocole de mesure .....	60
Phase 5 : Compléments des tests et essais .....	61
II.3.4.2. Fumée d'encens .....	61
II.3.4.2. Calcite.....	61
Phase 1: Préparation des expériences.....	61
Phase 2 : Préparation de l'échantillon de particules .....	61
Phase 3 : Déroulement des tests expérimentaux .....	61
Phase 4 : Compléments des tests et essais .....	62
II.3.4.3. Cendre .....	62
II.3.5. Logiciel de traitement des données « PASWIN ».....	63
II.3.7 Logiciel de modélisation et simulation numérique .....	63
II.4. Conclusion.....	66

### **Chapitre III**

#### **Agglomération- dispersion pour les particules submicroniques**

III.1. Introduction.....	68
III.2. Génération de la turbulence par les particules submicroniques.....	69
III.2.1. Caractéristique courant-tension .....	69



---

III.3. Phénomène d'agglomération.....	70
III.3.1. Constitution d'agrégats .....	70
III.3.2. Variation de la concentration particulaire de fumée .....	70
III.3.3. Variation du temps de stockage de la fumée .....	73
III.4. Rendement fractionnaire pour différentes fumées .....	74
III.5. Rendements fractionnaires pour différentes poudres.....	76
III.5.1. Calcite .....	76
III.5.2. Cendres .....	79
III.6. Etude numérique du couplage entre l'écoulement électro-hydrodynamique et les fines particules .....	81
III.6.1. Le flux électro-hydrodynamique.....	81
III.6.2. Équations régissant l'écoulement électro-hydrodynamique.....	82
III.6.3. Modélisation numérique pour les particules submicroniques.....	83
III.6.3.1. Hypothèses simplificatrices .....	83
III.6.2.2. Domaine de géométrie et conditions aux limites .....	84
III.6.2.3. Maillage du domaine de simulation .....	85
III.6.2.4. Distribution du potentiel électrique.....	87
III.6.2.5. Profil du champ électrique .....	88
III.6.2.6. Distribution de la charge d'espace générée dans l'espace inter-électrode..	89
III.6.2.7. Trajectoire des particules .....	92
III.6.2.8. Efficacités fractionnaires .....	95
III.7. Conclusion .....	96

## Chapitre IV

### Analyse de la distribution de la charge des particules le long du précipitateur

IV.1. Introduction.....	98
IV.2. Caractéristique (Courant-Tension) .....	98
IV.3. Courants partiels le long des portions de l'électrode collectrice .....	99
IV.4. Variation de la charge en fonction de la tension.....	101
IV.5. Variation de la charge en fonction du débit d'air .....	105
IV.6. Modélisation du processus par la méthode du plan d'expériences.....	109

---

IV.6.1. Introduction.....	109
IV.6.2. Plans composites à faces centrées.....	109
IV.6.3. Elaboration de la méthode .....	110
IV.6.4. Représentation du domaine d'étude expérimental.....	111
IV.6.5. Résultats expérimentaux des plans d'expériences :.....	112
IV.6.6. Modèles mathématiques .....	113
IV.6.6.1. Charge massique .....	113
a) Influence et effets des facteurs choisis.....	113
b) Courbes de prédiction centralisées .....	114
c) Courbes d'iso-réponses.....	115
IV.6.6.2. Rendement du précipitateur .....	117
a) Courbes de prédiction centralisées.....	117
b) Courbes d'iso-réponses.....	118
IV.7. Conclusion .....	119
Conclusion générale.....	120
Bibliographie.....	122

*Liste des figures*

Figure I.1 : Mode d'émission des particules.....4

Figure I.2 : Processus de formation des particules secondaires (Mode d'émission indirecte)...5

Figure I.3 : Ordre de grandeur de la granulométrie des particules dans l'air.....6

Figure I.4 : Taille des particules et leur pénétration dans le système respiratoire.....7

Figure I.5: Principe de fonctionnement d'un électrofiltre.....12

Figure I.6 : Lignes de champ en direction de la surface d'une particule isolante soumise à un champ électrique uniforme.....15

Figure I.7 : Schéma explicatif du mouvement d'une particule chargée entre deux plaques parallèles.....18

Figure I.8 : Variations du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules ( $\lambda_g = 0,065 \mu\text{m}$ ).....20

Figure I.9 : Variations du temps de relaxation en fonction du diamètre des particules ( $\eta_g = 1, 85 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$  et  $\rho_p = 2.7 \text{ g/cm}^3$ ).....21

Figure I.10 : Variations de la charge des particules prédite par la relation de Cochet en fonction du diamètre des particules.....22

Figure I.11 : Variations de la vitesse de migration théorique  $w_{th}$  en fonction de la taille des particules ( $\lambda_g = 0,065 \mu\text{m}$  et  $\eta_g = 1, 85 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ).....22

Figure I.12: Représentation schématisée de la décharge couronne (géométrie fil /cylindre)..26

Figure I.13 : Mécanisme de formation de la décharge couronne en polarité négative.....27

Figure I.15 : Précipitateur à un seul étage.....30

Figure I.16 : Précipitateur à deux étages.....31

Figure I.17 : Illustration schématisée du modèle laminaire.....32

Figure I.18 : Schéma des couches laminaires et du bilan massique de particules sur une longueur élémentaire  $dx$  (Modèle de Deutsch ).....34

Figure II.1: Dispositif expérimental du système proposé a) Schéma descriptif du banc expérimental ; b) photo réelle du banc expérimental.....39

Figure II.2 : Dimensions des portions isolantes (en mm).....41

Figure II.3 : Dimensions des portions conductrices (en mm).....	42
Figure II.4: Schéma représentatif du précipitateur électrostatique réalisé.....	42
Figure II.5 : Filtre mécanique à cyclone a) Schéma descriptif d'un filtre mécanique à cyclone. b) Photo réelle du cyclone utilisé.....	43
Figure II.6 : Cage de Faraday. a. Schéma descriptif d'une cage de Faraday b. Photographie réelle de la cage de Faraday réalisée.....	44
Figure II.7 : Photographie des particules de PVC a) Image capturée par appareil photo.b) Image obtenue par microscope (zoom: 120 fois).....	45
Figure II.8 : Dispositif expérimental utilisé a) Schéma descriptif du banc expérimental b) Photo réelle du dispositif expérimental.....	48
Figure II.9 : Schéma représentatif du filtre électrostatique.....	50
Figure II.10 : Photographie réelle du précipitateur électrostatique principal.....	50
Figure II.11 : Photographie du ballon de stockage de l'aérosol (a) Ballon à l'état initial vide (b) Ballon à l'état gonflé.....	51
Figure II.12 : Photographie du générateur de fumée et support de fixation des cigarettes et encens.....	52
Figure II.13 : Photographie de l'appareil d'injection de la poudre.....	52
Figure II.14 : Photographie de la conduite de tranquillisation des particules.....	53
Figure II.15 : Photographie représentant la chambre de collecte a) Plaque en nid d'abeille b) Chambre de collecte et vue de la sonde du granulomètre laser.....	54
Figure II.16 : Granulomètre laser modèle LAP 320 – marque TOPAS.....	56
Figure II.17 : Fumée dégagée lors de la combustion de l'encens.....	57
Figure II.18 : Interface de travail du logiciel « PASWin ».....	63
Figure II.19 : Interface de travail du logiciel « Comsol multiphysics ».....	66
Figure III.1 : Caractéristique courant-tension avec et sans particules.....	69
Figure III.2 : Rapport des courants avec et sans particules.....	70
Figure III.3 : Distribution en nombre/cm <sup>3</sup> en fonction des classes granulométriques pour différentes concentrations de fumée de cigarettes Marlboro.....	71
Figure III.4 : Distribution en nombre/cm <sup>3</sup> en fonction des classes granulométriques pour différentes concentrations de fumée de cigarettes Gauloises.....	72
Figure III.5 : Distribution en nombre/cm <sup>3</sup> en fonction des classes granulométriques pour différentes concentrations de la fumée d'encens.....	72

Figure III.6: Distribution en nombre/cm <sup>3</sup> par classes granulométriques en fonction du temps de stockage de la fumée d'encens emmagasinée dans le ballon.....	73
Figure III.7 : Efficacités fractionnaires par classes de diamètres en fonction des concentrations de fumée de cigarettes « Gauloises ».....	75
Figure III.8: Efficacités fractionnaires par classes de diamètres en fonction des concentrations de fumée de cigarettes Marlboro.....	75
Figure III.9 : Schéma descriptif des forces répulsives colombiennes qui s'exerçant sur les différents agglomérats.....	76
Figure III.10 : Distribution des différentes concentrations à l'entrée du précipitateur par classes granulométriques pour la poudre de calcite.....	77
Figure III.11 : Distribution des différentes concentrations à la sortie du précipitateur par classes granulométriques pour la poudre de calcite.....	78
Figure III.12 : Distributions granulométriques en entrée et en sortie pour différentes concentrations de cendres extraites d'une centrale thermique.....	78
Figure III.13 : Efficacités fractionnaires par classes granulométriques en fonction des différentes concentrations de la poudre de calcite.....	79
Figure III.14 : Distribution des différentes concentrations à l'entrée du précipitateur par classes granulométriques pour des cendres extraites d'une centrale thermique.....	80
Figure III.15 : Distribution des différentes concentrations à la sortie du précipitateur par classes granulométriques pour des cendres extraites d'une centrale thermique.....	80
Figure III.16 : Efficacités fractionnaires par classes granulométriques pour différentes concentrations des cendres extraites d'une centrale thermique.....	81
Figure III.17 : Procédure de modélisation de l'écoulement électro-hydrodynamique.....	84
Figure III.18 : Domaine de simulation avec les conditions aux limites (mm).....	85
Figure III.19 : Maillage triangulaire adapté et raffiné selon l'étude.....	86
Figure III.20 : Zoom sur la partie active du maillage raffiné.....	86
Figure III.21 : Distribution du potentiel électrique pour différentes valeurs de tensions appliquées. (U=15-30kV).....	88
Figure III.22 : Profil du champ électrique pour une tension appliquée U=27 kV.....	89

Figure III.23 : Distribution de la densité de la charge d'espace générée pour différentes valeurs de tension appliquée (U=15-30 kV).....	92
Figure III.24 : Trajectoires des particules pour différentes valeurs du rayon de la particule avec une valeur de tension appliquée (U=27 kV).....	94
Figure III.25 : Efficacité fractionnaire du précipitateur en fonction du rayon des particules pour différentes valeurs de tensions appliquées (U=15-30 kV).....	96
Figure IV.1: Caractéristique « Courant - tension » dans les deux polarités positive et polarité négative.....	99
Figure IV.2 : Distribution de l'intensité du courant le long de l'électrode de collecte pour différentes valeurs de tension en polarité négative .....	100
Figure IV.3 : Distribution de l'intensité du courant le long de l'électrode de collecte pour différentes valeurs de tension en polarité positive.....	100
Figure IV.4 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la position portions.Tension appliquée 8 kV.....	102
Figure IV.5 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions. Tension appliquée 10 kV.....	102
Figure IV.6 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions.Tension appliquée 12 kV.....	103
Figure IV.7 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions.Tension appliquée 14 kV.....	103
Figure IV.8 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions.Tension appliquée 16 kV.....	104
Figure IV.9 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la haute tension le long de du précipitateur.....	105
Figure IV.10 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions. Fréquence de 10 Hz.....	106
Figure IV.11 : Variation de la charge des particules en fonction de la position des portions Fréquence de 12 Hz.....	107
Figure IV.12 : Variation de la charge des particules en fonction de la position des portions. Fréquence de 14 Hz.....	107
Figure IV.13 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions. Fréquence de 16 Hz.....	108

Figure IV.14 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la fréquence le long de du précipitateur.....109

Figure IV.15 : Représentation géométrique du domaine d'étude du plan d'expériences.....111

Figure IV.16 : Coefficients des facteurs et des interactions sur la charge massique.....114

Figure IV.17 : Courbes de prédiction centralisées de la charge massique.....114

Figure IV.18 : Modélisation par surfaces de réponse de la sortie charge massique. Paramètre : Tension [kV].....116

Figure IV.19 : Modélisation par surfaces de réponse de la sortie charge massique Paramètre : Débit d'écoulement [kg/h].....116

Figure IV.20 : Modélisation par surfaces de réponse de la sortie charge massique Paramètre : Electrode de collecte.....116

Figure IV.21 : Courbes de prédiction centralisées du rendement total du filtre.....117

Figure IV.22: Modélisation par surfaces de réponse du rendement total du précipitateur. Paramètre: Tension [kV].....118

Figure IV.23: Modélisation par surfaces de réponse du rendement total du précipitateur. Paramètre : Electrode.....118

Figure IV.24: Modélisation par surfaces de réponse du rendement total du précipitateur Paramètre : Débit d'écoulement [kg/h].....119

# **Introduction Générale**



## *Introduction générale*

Le changement climatique est l'une des plus grandes préoccupations du monde moderne en ce moment, ce changement est dû principalement aux effets des déchets industriels et ménagers. La précipitation électrostatique est un moyen efficace d'éliminer les polluants solides en particules (tels que la poussière et la fumée) ou liquides (brouillard, huile) contenus dans le gaz injecté dans l'environnement. Ce processus de filtration est largement utilisé dans des appartements, les bureaux et les hôpitaux, ainsi que dans les ateliers, en raison de sa faible consommation d'énergie et de sa haute efficacité de précipitation.

Outre les énormes précipitateurs électrostatiques (ESP) utilisés pour les gaz de combustion des fonderies, cimenteries ou centrales thermiques, de nombreuses petites unités ont été conçues et fabriquées pour purifier l'air ambiant dans les ateliers, les bureaux, les hôpitaux, à très basse consommation d'énergie électrique et à haute efficacité de collecte des particules. Les ESP industriels réduisent les émissions de fumées de vapeurs et de poussières, contribuant ainsi au maintien d'un environnement propre et à l'amélioration de la qualité de l'air. Ils peuvent éliminer plus de 99% des particules des gaz de combustion en termes de masse. Les ESP sont utilisés industriellement depuis près d'un siècle pour collecter des matières particulaires. À l'origine, l'objectif était de récupérer des matériaux de valeur qui auraient autrement été perdus dans l'atmosphère, plutôt que de prévenir la pollution.

Dans cette thèse deux problèmes majeurs ont été analysés, le premier consiste dans la taille des particules de la matière à filtrer, le second traite le problème de la répartition de la charge des particules le long de l'ESP.

Dans le **premier chapitre**, une synthèse bibliographique est faite sur la précipitation électrostatique. On présente d'abord les caractéristiques des particules en suspension dans l'atmosphère terrestre, leurs origines ainsi que leurs impacts sur la santé et l'environnement. Ensuite, on expose les différents processus physiques qui régissent le fonctionnement des précipitateurs électrostatiques tels que : les processus de charge et de migration des particules. On termine ce chapitre par exposer les différents types des électro-filtres ainsi que les conceptions les plus récentes. On a essayé à travers ce premier chapitre de faire un éventail sur les précipitateurs électrostatiques afin de cerner toutes les problématiques et les phénomènes liés à ce processus.

**Le deuxième chapitre** décrit les procédures expérimentales que nous avons utilisées pour épurer différentes matières polluantes (microniques et submicroniques) et d'en évaluer le rendement traduisant ainsi l'efficacité du procédé.

Dans un souci de différencier entre les deux problématiques, nous avons élaboré deux protocoles complémentaires qui sont intitulés « **Pilote 1** » pour le banc d'essai conçu au sein du laboratoire APELEC de Sidi Bel Abbès et « **Pilote 2** » pour le banc d'essai utilisé au niveau du centre de recherche CNRS Grenoble – France.

Dans le domaine d'épuration électrostatique de l'air, le rendement des précipitateurs électrostatiques des particules, pour des diamètres supérieurs à 1  $\mu\text{m}$ , ne pose aucun souci car il atteint généralement un rendement maximal. Le problème majeur subsiste dans les particules submicroniques de diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$  et plus précisément dans la gamme entre 0,3  $\mu\text{m}$  et 0,7  $\mu\text{m}$ . Pour cette raison, à travers le travail proposé dans **le troisième chapitre**, on tente de mettre un peu de lumière sur les phénomènes rencontrés dans ce genre d'installations et leurs impacts sur le rendement fractionnaire.

La procédure expérimentale proposée dans ce chapitre consiste à évaluer la distribution en taille des particules contenues dans différentes fumées (cigarettes, encens) et aussi différentes poudres (calcite, cendres). Nous prélevons par l'intermédiaire de sondes un volume de gaz circulant dans le précipitateur pilote, en entrée et en sortie. Ces prélèvements sont analysés grâce à un granulomètre laser. On obtient alors la distribution en taille granulométrique et le rendement fractionnaire pour chaque classe de diamètre.

On trouve dans la littérature beaucoup de travaux effectués sur le phénomène de charge en fonction du diamètre de la particule, et en fonction du temps de séjour,...etc. Cependant, peu de travaux ont été effectués pour la détermination de la charge électrique acquise par l'effet corona par les particules le long de l'ESP afin de caractériser la distribution de cette charge. C'est justement l'objectif du **chapitre quatre**, qui est la mesure du rapport « charge/masse » ou ce qu'on appelle la charge massique, à travers des échantillons de particules prélevés par aspiration le long du précipitateur réalisé dans notre laboratoire. Il faut noter que ce précipitateur a la particularité d'accéder à la mesure de la charge des particules à travers plusieurs sections constituant la longueur de l'ESP pour l'analyse de la distribution de dépôt des particules le long de l'électrode de collection et surtout comprendre le comportement de la charge des particules. Afin d'appuyer cette étude, on a effectué une modélisation par la méthode des plans d'expériences afin de valider l'hypothèse émise lors des essais expérimentaux préliminaires.

# **Chapitre I**

---

## **État de l'Art sur les Précipitateurs Électrostatiques**

## *Chapitre I*

### *État de l'art sur les précipitateurs électrostatiques*

#### **I.1. Introduction**

Le changement climatique est l'un des plus grandes préoccupations du monde moderne en ce moment, ce changement est dû principalement aux effets de déchets industriels et ménagers.

La précipitation électrostatique est un moyen efficace d'éliminer les polluants solides en particules (tels que la poussière et la fumée) ou les liquides (brouillard, huile) contenus dans le gaz injecté dans l'environnement. Ce processus de filtration largement utilisé dans des appartements, des bureaux et des hôpitaux, ainsi que des ateliers, en raison de sa faible consommation d'énergie et de haute efficacité des précipitations.

Outre les énormes précipitateurs électrostatiques (ESP) utilisés pour les gaz de combustion des fonderies, cimenteries ou centrales thermiques, de nombreuses petites unités ont été conçues et fabriquées pour purifier l'air ambiant dans les ateliers, les bureaux, les hôpitaux, etc. à très basse consommation d'énergie électrique et à haute efficacité de collecte des particules.

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique est faite sur la précipitation électrostatique. On présente d'abord les caractéristiques des particules en suspension dans l'atmosphère terrestre, leurs origines ainsi que leur impact sur la santé et l'environnement.

On présente ensuite les différents processus physiques qui régissent le fonctionnement des précipitateurs électrostatiques tels que : les processus de charge de la particule, la migration des particules. Et on finit par exposer les différents types des électrofiltres ainsi que les conceptions les plus récentes.

#### **I.2. Problématique de la pollution de l'air**

En plus de l'oxygène, l'azote et les gaz rares qui constituent l'atmosphère. On trouve certains contaminants qui existent sous différentes formes particulières:

- Les particules solides.
- Les particules liquides.
- Les particules gazeuses.

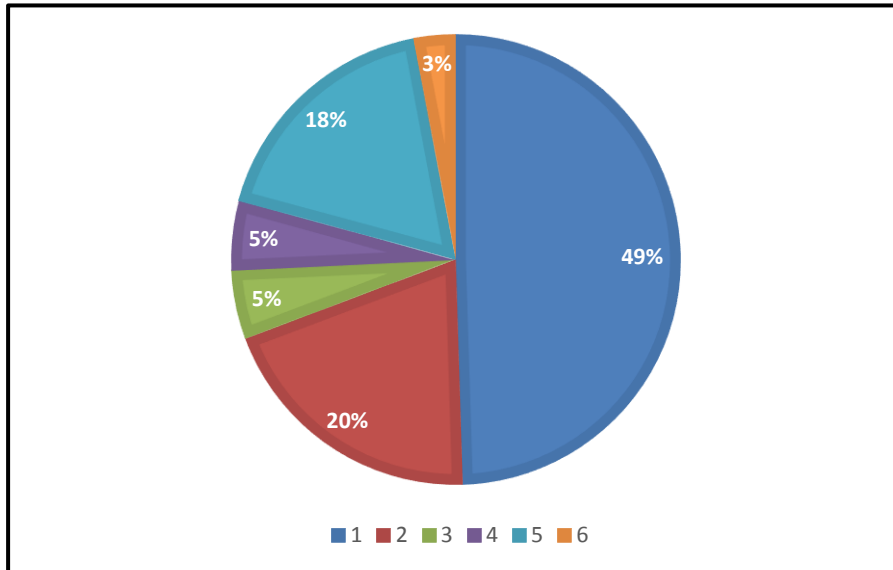
Le mélange des particules avec l'air forme ce qu'on appelle l'aérosol. Ces aérosols sont soit stables ou instables selon leurs types. Quelques types d'aérosols peuvent être stables pour des durées de quelques secondes jusqu'à une année.

Les particules en suspension (notées PM qui vient de l'anglais Particule Matter) sont souvent classées selon leurs propriétés aérodynamiques qui définissent le transport et la mise en suspension des particules dans l'air et elles sont associées à leur composition chimique et à leur source.

Ces particules varient en termes de taille, de nombre, de surface, de composition chimique, de solubilité et d'origine et sont principalement composées de sulfate, nitrates, ammonium, chlorure de sodium, carbone, matières minérales et eau.

### I.2.1. Mode d'émission des particules et leurs sources

Il existe deux modes d'émission des particules dans l'atmosphère, le premier mode est l'émission directe concernant les grosses particules (diamètre  $> 10\mu\text{m}$ ). Le deuxième mode est l'émission indirecte qui comprend les particules fines (diamètre  $< 10\mu\text{m}$ ). Le schéma de la figure I.1 donne un aperçu sur ces particules ainsi que leurs sources [1].



**Figure I.1** : Mode d'émission des particules

1. Autres composés: Métaux, sels marins, poussières telluriques
2. Sulfate
3. Nitrate
4. Amonium
5. Nombreux composés organiques secondaires
6. Suie

### I.2.1.1. Particules primaires issues du mode d'émission directe

Les particules primaires sont originaires du mode d'émission directe, ça concerne principalement les sources naturelles tels que : Les poussières minérales, les embruns marins, les végétaux (pollens) et les feux de forêts.

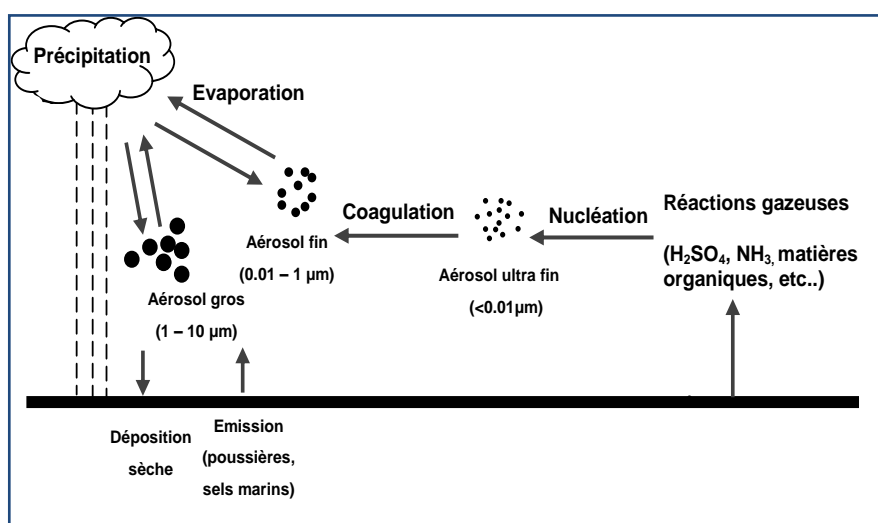
Et aussi les sources procréées par l'action humaine tel que : Les activités industrielles (construction, secteur minier, cimenteries, fabrication de céramique et de briques, fonderie), ces émissions industrielles représentent environ 408 Mt/an et ceci à l'échelle internationale [2].

La combustion de gazole (diesel) et d'essence des véhicules automobiles, l'érosion des chaussées sous l'effet de la circulation routière et l'abrasion des pneus et des freins et les activités minières [2].

### I.2.1.2. Particules secondaires issues de mode d'émission indirecte

Les particules secondaires sont surtout présentes dans les matières fines. Elles sont générées sous l'effet des réactions chimiques en phase gazeuse avec des polluants gazeux comme les oxydes d'azote principalement émis par la circulation automobile et certains procédés industriels, et les combustibles contenant du soufre.

La nucléation, la condensation et la coagulation qui sont des processus de formation de nouvelles particules solides et qui modifie ensuite les caractéristiques de la population de particules. La figure I.2 présente ce processus de formation [3].



**Figure I.2** : Processus de formation des particules secondaires  
(Mode d'émission indirecte)

## I.2.2. Granulométrie des particules

Les dimensions des particules existant dans l'atmosphère peuvent varier de 1 nanomètre environ (agrégats moléculaires) jusqu'à 100  $\mu\text{m}$  (poussières industrielles ou naturelles) selon indiqué dans la figure I.3.

On distingue deux types de particules selon leur taille et leur mode de formation : les particules grossières et les particules fines. Pour la distinction du diamètre des particules, on utilise les fractions suivantes (figure I.3) [4] [5]:

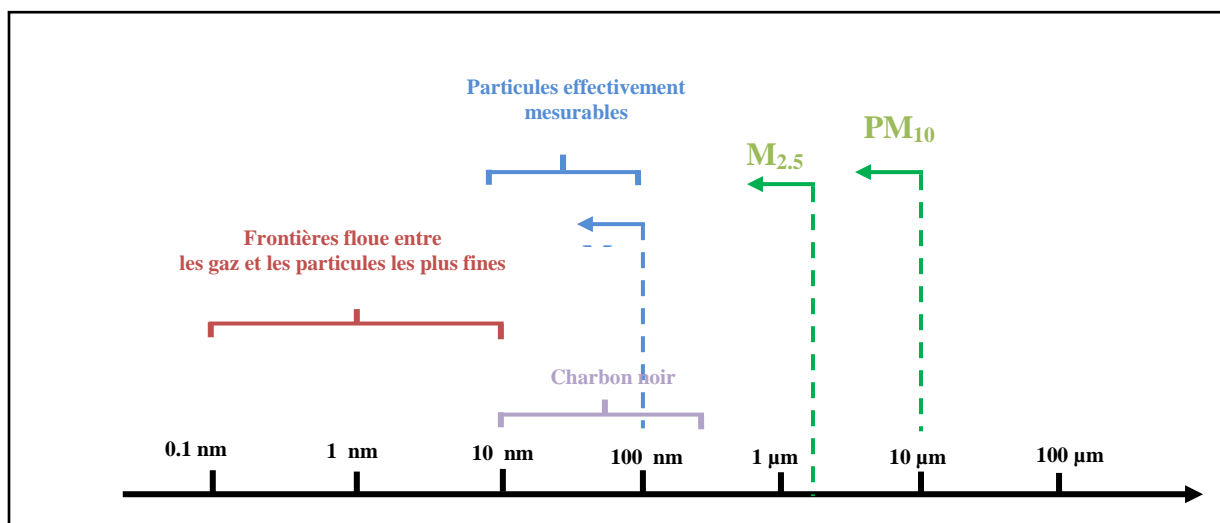


Figure I.3 : Ordre de grandeur de la granulométrie des particules dans l'air.

- TSP (Total Suspended Particules): comprend toutes les particules.
- **Grossières:** particules dont le diamètre aérodynamique est compris entre 2,5 et 10  $\mu\text{m}$ .
- **PM<sub>10</sub>:** particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10  $\mu\text{m}$ .
- **PM<sub>2,5</sub>:** particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$ .
- **PM<sub>1</sub>:** particules ultrafines dont le diamètre est inférieur à 1  $\mu\text{m}$ .
- **PM<sub>0,1</sub>:** nanoparticules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 0,1  $\mu\text{m}$ .

## I.2.3. Effets des particules

### I.2.3.1. Effets sur la santé de l'être humain

Les polluants atmosphériques sont en contact direct avec le système respiratoire de l'être humain qui se subdivise en trois parties principales:

- Partie supérieure (le naso-pharynx) ;
- Partie au milieu (le segment trachéo-bronchique) ;
- La partie inférieure (le segment pulmonaire).

La figure I.4 nous donne un aperçu global sur la nature des différentes particules qui existe dans l'atmosphère avec leur ordre de grandeur et la profondeur de leur pénétration dans le système respiratoire [6] [7] [8] [9].

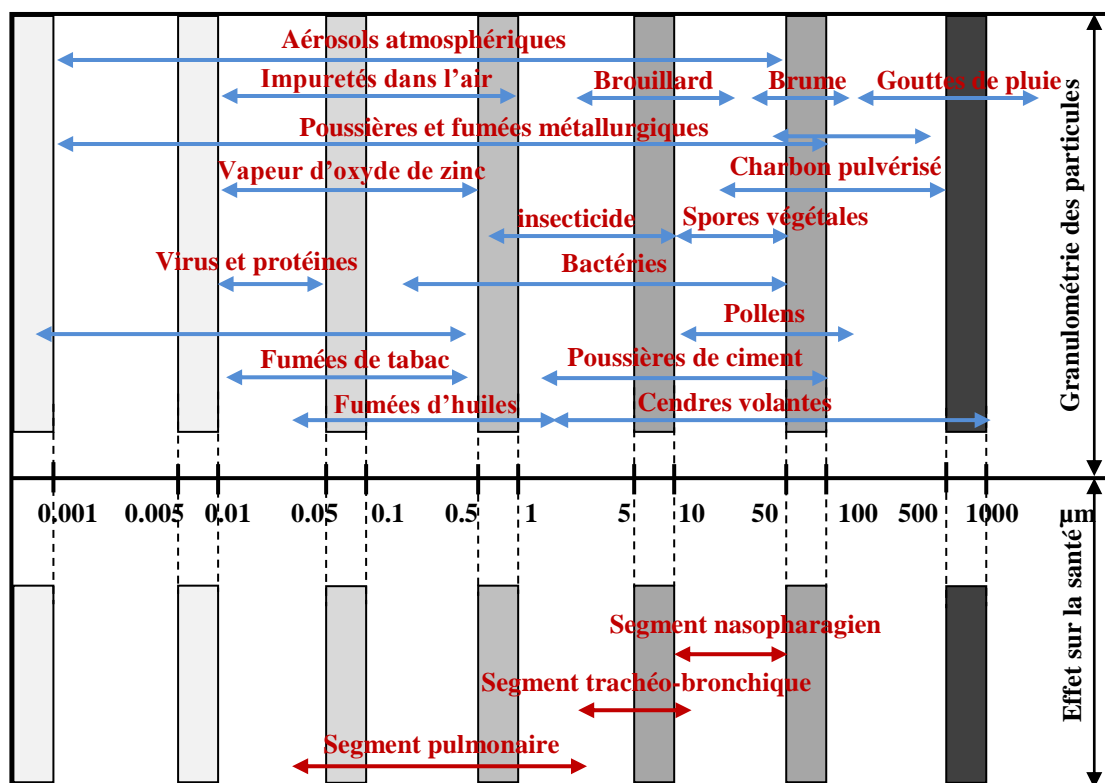


Figure I.4 : Taille des particules et leur pénétration dans le système respiratoire [7].

En moyenne, un être humain peut respirer une quantité d'air pouvant aller jusqu'à 15 m<sup>3</sup> par jour. Les risques sur la santé de l'être humain varient en fonction de la nature particulière de l'aérosol inhalé, ce risque devient majeur lorsque la granulométrie décroît. En se référant à la figure I.4, on constate :

Les particules d'origine naturelle de taille supérieure à 10 μm ont un faible impact sur la santé car elles sont captées au niveau du segment naso-pharyngien puis évacuées généralement par mouchage. Les particules grossières qui sont bornées entre les 2,5 et 10 μm, pénètrent jusqu'au segment trachéo-bronchique. Elles pénètrent profondément dans le système respiratoire selon leur taille.



Les particules  $PM_{2,5}$  pénètrent plus profondément et les plus petites peuvent être acheminées au segment pulmonaire (alvéoles pulmonaires).

Cette pénétration des particules surtout au niveau des alvéoles pulmonaire est responsable de l'irritation des voies respiratoires, de l'augmentation de l'intensité des crises d'asthmes chez des sujets asthmatiques et de l'augmentation de décès prématurés, d'une diminution de l'espérance de vie [9] [10] [11].

Le tableau I.1 montre les effets toxiques et les maladies causées par quelques substances en suspension en l'air [12].

**Tableau I.1:** Quelques substances et leurs effets sur la santé humaine.

Substances	Effets toxiques
Benzols	Troubles hématologiques
Cétones	Irritation voies respiratoires
Isocyanates	Asthme, irritation voies respiratoires
Anhydride phtallique et triméllitique	Signes généraux, asthme.
Formol	Asthme retardé, eczéma de contact, irritation.
Lindane	Troubles hématologiques.
Pentachlorophénol	Troubles hématologiques, eczéma de contact

### I.2.3.2. Effets sur l'environnement

La pollution particulaire peut abimer la biosphère, en effet les particules en suspension peuvent impacter la faune et la flore en réduisant l'accès à la lumière et à l'oxygène des plantes, notamment lorsqu'elles sont associées à des particules de plus grandes tailles. Concernant les particules fines, les plantes les absorbent lors de leur déposition sur le sol dont le degré de toxicité dépend de leur composition chimique et de leur éventuelle association à d'autres polluants.

Les bâtiments et le mobilier urbain sont aussi dégradés par les poussières et les pluies acides (sous l'effet du  $SO_2$ ) ce qui engendre la perte des repères architecturaux et des frais supplémentaires pour les travaux d'entretien et de nettoyage [9].

### I.2.3.3. Effets sur le climat

Les particules en suspension provoquent deux sortes d'effet sur le climat, un effet direct et un autre indirect [13] [14].

- **L'effet direct** est en relation avec le bilan radiatif de la terre, Les anomalies climatiques relevées depuis la seconde moitié du XXe siècle indiquent clairement que les pollutions d'origine anthropique seraient responsables d'un réchauffement terrestre trop rapide et la concentration actuelle en dioxyde de carbone dans l'atmosphère est supérieure à celle des 650000 dernières années.
- **L'effet indirect** des particules sur le climat, pourrait être sous forme de gouttelettes d'eau formées dans les nuages. Les nuages ont besoin d'un noyau de condensation, et ces noyaux par conséquent constituent les particules. L'augmentation de ces gouttelettes et ces nuages conduit directement à la nébulosité, qui à son tour entraîne un énorme refroidissement du sol.

### I.3. Techniques d'épuration des gaz pollués

Afin de lutter contre la dégradation de la qualité de l'air. On présente plusieurs techniques d'épuration des gaz pollués Ces technique diffèrent selon la technologie utilisée, elles sont classées en 3 groupes : la méthode de traitement classique, le traitement par plasma et la précipitation électrostatique [15] [16].

#### I.3.1. Techniques classiques pour la dépollution des gaz

Les techniques d'épurations classiques sont multiples, on va citer les principales d'entre elles [17] [18]:

- **La filtration:** elle consiste à l'interposition d'une membrane semi-perméable qui permet la séparation des particules solides ou liquides contenues dans le gaz. Elle est la base de toute séparation dans le prétraitement des effluents gazeux.

- **L'absorption:** Cette méthode utilise un substrat qui retient les substances à éliminer. On parle de « lavage du gaz » les polluants gazeux pénètrent dans une phase liquide et y restent piégés.

- **Le piégeage cryogénique:** elle utilise la condensation partielle à basse température (inférieure à 200°K) qui permet de séparer certains constituants.

- **La combustion:** elle est basée sur l'oxydation à chaud entre 700 et 900°. Elle est principalement utilisée pour la dépollution de fumées contenant des hydrocarbures. En les transformant en éléments inertes non polluants

---

### I.3.2. Technique de dépollution par précipitation électrostatique

La précipitation électrostatique (ESP) est une technologie industrielle importante depuis le début des années 1900 et peut être considérée comme le principal dispositif de contrôle de la pollution atmosphérique dans les applications industrielles telles que l'épuration des fumées des centrales au charbon et des moteurs diesel. Dans cette conception, les particules sont chargées par le bombardement ionique dans le canal de précipitation, transportées vers les plaques collectrices par les forces électriques et déposées sur celles-ci.

## I.4. Les précipitateurs électrostatiques (électrofiltres)

### I.4.1. Aspect historique

- Vers 600 ans av JC, les philosophes grecs étaient les premiers à observer les phénomènes électrostatiques, ils ont remarqué l'attraction de petites particules par l'ambre jaune (résine fossile) frotté sur de la peau d'animal.
- Au début du 17<sup>ième</sup> siècle, W. Gilbert a noté qu'un diélectrique frotté attire les particules de fumée produite par un feu éteint.
- Au 18<sup>ième</sup> siècle, F. Coulomb a introduit les relations quantitatives décrivant les forces électrostatiques par de nombreux rapports sur les effets électrostatiques.
- Au début du 19<sup>ième</sup> siècle, le premier appareil expérimental voit le jour en utilisant ces phénomènes, il est issu des travaux de Hohlfeld. montrant qu'une étincelle électrique pouvait dissiper la fumée contenue dans une bouteille.
- En 1850, Guitard avait observé qu'une décharge couronne produisait les mêmes effets sur la fumée.
- En 1883, Utilisant ces avancées scientifiques, O. Lodge élabore, le concept de précipitateur électrostatique, encore appelé électrofiltre. Il réalise ainsi les premières expériences de collecte de particules. Cependant, les connaissances scientifiques dans le domaine des hautes tensions étaient insuffisantes et ont conduit à des échecs.
- En 1907, l'avènement des hautes tensions aide F. G. Cottrell à développer un collecteur de brumes acides. Le succès de cet électrofiltre a conduit à son expansion et à son utilisation jusqu'à nos jours, dans des domaines très variés et pour des sources de pollution diverses [17].

### I.4.2. Définition

La précipitation électrostatique est une technique permettant d'éliminer les particules en suspension dans un gaz en utilisant une force électrostatique. Le précipitateur

électrostatique (ESP) a été largement utilisé dans diverses industries telles que les chaudières utilitaires, les fours à ciment, etc., et a également été utilisé pour nettoyer l'air intérieur des maisons, bureaux, hôpitaux et usines de transformation des aliments. L'ESP peut être utilisé avec une grande efficacité de collecte et une faible perte de charge. L'efficacité de la collecte est généralement supérieure à 99%. Les particules submicroniques peuvent aussi être collectées efficacement. La perte de charge est bonne. Ceci est un avantage important de l'ESP, ce qui entraîne un faible coût d'exploitation.

### **1.4.3. Principe de fonctionnement**

Le principe de base du fonctionnement d'un électrofiltre est relativement pratique à comprendre. Il consiste à charger des particules de poussières, initialement neutres, présentes dans un effluent gazeux, puis à les récupérer par collecte pour, à la fin, libérer un gaz purifié [17] [19].

#### **1.4.3.1 Phase de chargement électrique des particules**

Tout d'abord, l'électrode émissive, connectée à une alimentation en haute tension de courant direct, génère un champ électrique suffisamment élevé pour initier une décharge électrique dans l'intervalle inter-électrodes.

Elle apparaît soit sous la forme de points lumineux répartis le long d'électrode de charge si la tension est négative et on l'appelle « spots » ou sous la forme d'une « gaine lumineuse » si la tension est positive.

La géométrie favorisant la formation d'un nombre important de charges et limitant le passage à l'arc sera privilégié, ce qui explique l'utilisation de décharges électriques de polarité négative.

#### **1.4.3.2 Phase de collecte des particules chargées**

Les charges créées dans le gaz vont ainsi être transférées aux particules de poussières en suspension. Sous l'effet des forces électrostatiques, les particules chargées de même polarité que l'électrode émissive vont dériver vers l'électrode de collecte reliée à la masse [20].

#### **1.4.3.3 Phase de récupération des particules collectées**

Lorsque l'épaisseur de la couche des particules solides collectées atteint un niveau prédéterminé, l'électrode collectrice est frappée mécaniquement à l'aide d'un marteau, et la

---

couche tombe dans une trémie située en dessous. Ces particules sont ensuite emportées à l'extérieur de l'électrofiltre

Dans le cas idéal, le gaz dépourvu de poussières sort dépollué. Les poussières amassées sur l'électrode collectrice sont récupérées en frappant (filtre sec) ou en faisant couler un liquide (filtre humide).

La figure I.5 est un schéma explicatif du principe de fonctionnement d'un précipitateur électrostatique.

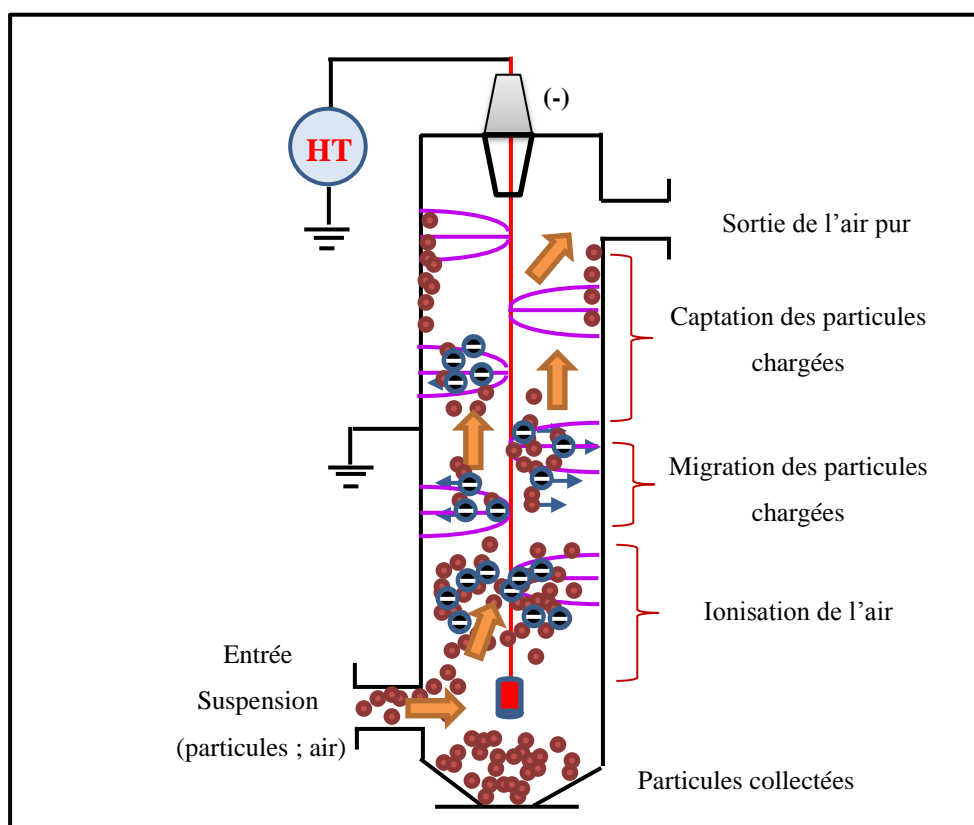


Figure I.5: Principe de fonctionnement d'un électrofiltre.

Derrière cette explication simplifiée, se cachent de nombreux phénomènes physico-chimiques dont voici un aperçu.

Le transport et la migration des particules au sein des ESP's sont gouvernés par de nombreux phénomènes physiques interconnectés selon K. R. Parker. À l'exception de l'influence des particules, tous ces paramètres et leurs interactions physico-chimiques dépendent de la géométrie de l'électrofiltre.

Les phénomènes de base dans l'ESP comprennent la décharge couronne, l'écoulement d'air et le chargement et le transport des particules. Ces phénomènes sont

mutuellement couplés et certains sont forts et dominants tandis que d'autres sont faibles ou même négligeables. Sous un champ électrique suffisamment fort, une décharge couronne se produit entre le (s) fil (s) de décharge et les plaques collectrices mises à la terre. L'ionisation des molécules de gaz provient d'une gaine très étroite, appelée zone d'ionisation (ou zone active), près de la surface du fil de décharge. La zone comprise entre la limite externe de la zone d'ionisation et la plaque collectrice est appelée zone de dérive (ou zone passive).

Dans la zone de dérive, les particules sont chargées par les ions induits par décharge couronne puis se dirigent vers les plaques collectrices sous l'influence de la force de Coulomb. Les particules chargées génèrent également leur propre champ électrique local, ce qui peut affecter le champ généré par la décharge couronne en fonction de la quantité de charges déposée sur la particule. Les particules neutres et chargées sont influencées par la force de traînée exercée par l'écoulement d'air. En revanche, la perturbation du flux d'air due aux particules est plus faible si la concentration des particules est faible.

En général, l'influence de la distribution des charges spatiales induite par la décharge couronne sur l'écoulement est forte entraînant un vent électrique souvent appelé EHD. Son influence inverse (à savoir ion ou convection de charge) est relativement faible et négligeable dans le cas où le champ électrique est fort, en particulier près de la surface du fil où le champ électrique est si fort que la vitesse de dérive des ions est plus importante que la vitesse d'écoulement. La vitesse de dérive des ions gazeux peut être comparable à la vitesse d'écoulement dans les zones proches de la plaque mise à la terre (parois) [19] [21].

#### **I.4.4. Migration des particules chargées**

Dans la nature, les particules peuvent être soumises à diverses forces : les forces de volume (force de flottabilité, force électrique, force magnétique, par exemple) et les forces de surface (force diélectrophorétique, force de traînée, par exemple).

Dans notre travail, nous n'évoquerons que les deux forces électriques mises en jeu, à savoir, la force de Coulomb et la force de traînée [17] [19] [22] [23].

##### **I.4.4.1. Force de Coulomb**

Une particule chargée est soumise à une force électrostatique dès qu'elle est proche de surfaces chargées ou d'autres particules chargées. En présence d'un champ électrique  $\vec{E}$ , les particules ayant acquis une charge électrique  $q_p$  subissent la force de Coulomb  $\vec{F}_e$  proportionnelle à la charge, dont l'expression est [23] [24] :

$$\vec{F}_e = q_p \vec{E} \quad (\text{I.1})$$

L'expression I.1 est l'équation de base de la force électrostatique agissant sur les particules en suspension dans les précipitateurs électrostatiques.

#### I.4.4.2. Force diélectrophorétique

De nombreux travaux ont été effectués sur la force diélectrophorétique (DEP) agissant sur des particules allant des poussières aux cellules biologiques. Cette force s'exerce sur une particule non chargée dans un gradient de champ électrique. Elle est proportionnelle au volume de la particule ( $\propto d_p^3$ ) et au gradient du champ électrique qui lui est appliqué  $\nabla E^2$ . Pour une sphère diélectrique de diamètre  $d_p$ , l'expression est :

$$F_{DEP} = \frac{\pi}{4} \cdot \varepsilon_m \cdot d_p^3 \cdot K \cdot \nabla E^2 \quad (\text{I.2})$$

La constante  $K$  est définie par :

$$K = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_m}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_m} \quad (\text{I.3})$$

Où  $\varepsilon_s$  et  $\varepsilon_m$  sont les permittivités respectives de la sphère et du milieu.

La force diélectrophorétique est négligeable dans certaines conditions.

#### I.4.5. Mécanismes de charge des particules

La charge des particules en suspension dans l'air est réalisable grâce à divers mécanismes. Une particule peut recueillir des charges électriques par charge « naturelle » par attachement des ions existant dans l'atmosphère, par « Triboélectrisation » qui regroupe les phénomènes de charge par contact et par frottement ou par « charge d'espace ionique ».

La force de Coulomb régie par la loi de Coulomb, base de toute l'électrostatique, est la principale cause de mise en mouvement des particules dans les filtres électrostatiques. Une augmentation de la charge des particules est donc nécessaire afin d'initier leur migration vers les électrodes de collecte d'un précipitateur. Cela peut être provoqué par une forte densité d'ions due à une décharge couronne dans l'espace inter-électrodes. Le processus de charge dépend alors de plusieurs facteurs parmi lesquels les plus importants sont la densité de charge ionique, l'intensité du champ électrique local, ainsi que la taille des particules [23].

Dans ce processus de charge des particules, deux mécanismes différents permettent le transport des porteurs de charge (ions et électrons) à la surface de la particule : la migration par champ et la diffusion thermique. Ces deux mécanismes peuvent agir séparément ou de façon combinée, on parle alors de charge mixte. Au total, on distingue [25] [26] :

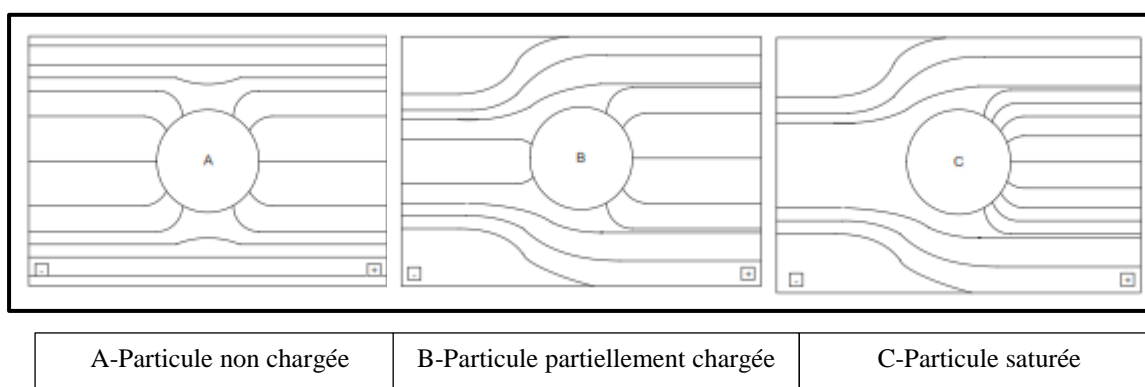
- **La charge par champ** : pour les particules de diamètre  $d_p > 1 \mu\text{m}$
- **La charge par diffusion** : pour les particules de diamètre  $d_p < 0.1 \mu\text{m}$
- **La charge mixte** : pour les particules de diamètre  $d_p > 0.1 \mu\text{m}$

Quel que soit le mécanisme de charge, la charge électrique acquise par une particule est le résultat des interactions entre celle-ci et les ions résultant de la décharge couronne. Les deux mécanismes de charge interviennent ensemble pour fournir aux particules, une charge globale dont l'importance relative est principalement déterminée par leurs dimensions et l'intensité du champ électrique [27] [28].

#### I.4.5.1. La charge par champ

Comme l'indique son nom, dans ce mécanisme de charge les ions sont apportés à la surface de la particule grâce à la force électrostatique causée par un champ électrique extérieur. Cette force est équilibrée par la force de répulsion créée par la charge répartie à la surface de la particule. En effet, une particule présente dans un gaz provoque une distorsion locale du champ électrique, les lignes de champ aboutissent à la surface de celle-ci. Cette distorsion du champ dépend de la nature de la particule lorsque la particule est conductrice, la distorsion du champ est maximale. Pour une particule isolante (non conductrice), la distorsion du champ dépend de sa permittivité. Ainsi, l'intensité du champ électrique augmente à la surface de la particule.

Dans ce cas, les ions présents dans le gaz et se déplaçant le long des lignes de champ, peuvent atteindre la surface de la particule. Chaque ion qui atteint la surface de la particule modifie la distribution locale du champ électrique. Cependant, tant que le champ électrique créé par la charge de la particule est inférieur au champ maximum qui existe à la surface de la



**Figure I.6** : Lignes de champ en direction de la surface d'une particule isolante soumise à un champ électrique uniforme [19].



particule lorsqu'elle n'est pas chargée, les ions continuent à atteindre la surface de celle-ci. Lorsque la charge acquise est suffisante, les lignes de champ contournent la particule ; on dit que la particule a acquis « la charge de saturation par champ » (figure I.6).

Une première théorie concernant la charge par champ a été développée en 1923 par Rohmann complétée par Pauthenier en 1932. Ces chercheurs montrent que les ions arrivent à la surface d'une particule tant que la charge de celle-ci n'est pas suffisante pour repousser. Pauthenier a montré qu'en raison du phénomène de répulsion électrostatique, seule une partie réduite de la surface des particules est atteinte par les ions. Continuant dans le même sens, d'autres auteurs ont apporté leurs contributions. Pour les grosses particules ( $d_p > 2 \mu m$ ), c'est le mécanisme de charge par champ qui est dominant. Pour les petites particules ( $d_p < 2 \mu m$ ), la diffusion thermique devient dominante et la charge par diffusion devient importante.

La charge d'une particule sphérique est donnée par l'équation de la charge par champ de Pauthenier [24]:

$$q_p(t) = q_{ps} \cdot \frac{t/\tau}{1+t/\tau} \quad (I.4)$$

Avec

$$q_{ps} = \pi \cdot \varepsilon_0 \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r+2} \cdot d_p^2 \cdot E \quad (I.5)$$

$$\tau = 4 \cdot \frac{\varepsilon_0}{\rho_i \cdot \mu_i} = 4 \cdot \frac{\varepsilon_0}{n_i \cdot e \cdot \mu_i} = 4 \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot E}{j} \quad (I.6)$$

Où :

$q_{ps}$  : Charge de saturation (C),

$t$  : Temps de charge (s),

$\tau$  : Constante de temps de charge (s),

$\varepsilon_0$  : Permittivité du vide ( $8.85 \times 10^{-12}$  F/m),

$\varepsilon_r$  : Permittivité relative de la particule,

$d_p$  : Diamètre de la particule (m),  $E$  le champ électrique (V /m),

$j$  : Densité de courant ( $A/m^2$ ),

$\rho_i$  : Densité de charge ( $C/m^3$ ),

$\mu_i$  : Mobilité ionique ( $m^2/V*s$ ),

$e$  : Charge électronique ( $\approx 1,6 \times 10^{-19} C$ ),

$n_i$  : Concentration des ions dans l'espace ( $m^{-3}$ ).

Pour une particule conductrice, l'équation I.5 devient :

$$q_{ps} = 3\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad (\varepsilon_r \rightarrow \infty) \quad (I.7)$$

### I.4.5.2. Charge par diffusion

La charge par diffusion est due à l'énergie cinétique des ions qui bombardent la particule indépendamment du champ électrique. Ce processus de charge par diffusion a été imaginé pour expliquer la charge des particules lorsque le champ électrique appliqué est faible (ou même nul) et lorsque la taille des particules est suffisamment petite (quelques libres parcours moyens).

Il est alors nécessaire de prendre en compte le phénomène de diffusion des ions dans le processus de charge.

Ce mécanisme met en jeu la probabilité de collision entre les particules et les ions animés d'un mouvement aléatoire d'agitation thermique. Dans une zone où le champ électrique appliqué est nul, les ions ont une répartition uniforme autour des particules.

Dans ces conditions, tous les éléments de surface d'une particule ont la même probabilité de choc avec les ions et la particule peut accumuler une certaine charge électrique. L'expression de la charge par diffusion  $q_p(t)$  d'une particule donnée est [24]:

$$q_p(t) = q^* \cdot (1 - t/\tau^*) \quad (\text{I.8})$$

$$\text{Avec } q^* = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p \cdot k \cdot T}{e} \quad (\text{I.9})$$

$$\text{Et } \tau^* = \frac{8 \cdot \epsilon_0 \cdot k \cdot T}{d_p \cdot C_i \cdot n_i \cdot e^2} = 8 \cdot \epsilon_0 \left( \frac{m_i \cdot k \cdot T}{3} \right)^{1/2} \left( \frac{\mu_i \cdot E}{d_p \cdot j \cdot e} \right) \quad (\text{I.10})$$

Où ;

$q^*$  : est la constante de charge (C).

$\tau^*$  : la constante de temps de charge par diffusion (s).

$k$  : la constante de Boltzmann ( $\approx 1,38 \times 10^{-23}$  J/K).

$T$  : la température (K).

$e$  : est la charge électronique ( $\approx 1,6 \times 10^{-19}$  C).

$C_i$  : est la vitesse thermique de l'ion (m/s).

$n_i$  : est la concentration des ions dans l'espace ( $\text{m}^{-3}$ ).

$m_i$  : est la masse d'un ion (kg).

### I.4.5.3. La charge mixte

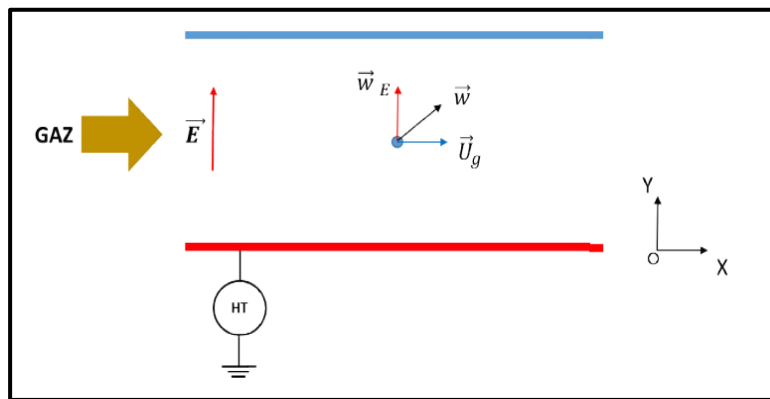
Les deux mécanismes opèrent simultanément pour les particules dont la taille est comprise entre 0,1 et 1  $\mu\text{m}$ . La charge totale acquise par une particule à l'issue du processus n'est cependant pas la somme des charges apportées par chacun des deux mécanismes. Des

travaux [29] ont été réalisés sur la charge mixte, en particulier par Lawless et Altman qui ont modifié des modèles préexistants et ont abouti à des relations assez simples qui prennent en compte les interactions des deux mécanismes de charge.

Les particules présentes à l'intérieur d'un électrofiltre, une fois chargées par ces différents mécanismes, subissent la force de Coulomb lorsqu'elles sont soumises à un champ électrique. Cette force électrostatique est responsable de leur mouvement vers les électrodes collectrices. C'est ce processus appelé "la migration" que nous étudierons à présent.

#### I.4.6. Vitesse de migration des particules chargées

Soit une particule solide sphérique de diamètre  $d_p$  ; de charge électrique  $q_p$  et de vitesse  $\vec{w}$  se trouvant dans un écoulement de gaz laminaire de vitesse  $\vec{U}_g$ , soumise à un champ électrique supposé uniforme et constant  $\vec{E}$  (figure I.7) [22].



**Figure I.7 :** Schéma explicatif du mouvement d'une particule chargée entre deux plaques parallèles.

Son mouvement à l'intérieur du précipitateur est régi par la relation fondamentale de la dynamique :

$$m_p \cdot \frac{d\vec{w}}{dt} = \vec{F}_f + \vec{F}_e \quad (\text{I.11})$$

Où ;

$m_p$ : masse de la particule,

$\vec{F}_e$  et  $\vec{F}_f$ : respectivement la force électrique et la force de traînée données par les

expressions suivantes :

$$\vec{F}_e = q_p \cdot \vec{E} \quad (\text{I.12})$$

$$\vec{F}_f = C_f \cdot (Re_p) \cdot S_p \cdot \frac{\rho g}{2} w_E \vec{w}_E \quad (\text{I.13})$$

Où

$w_E$  est la vitesse relative de la particule par rapport à l'écoulement.

$C_f \cdot (Re_p)$  est le coefficient de traînée,

$S_p$  représente la section droite de la particule (la section de particule interceptée par le fluide),

Le coefficient de traînée dépend du nombre de Reynolds de la particule  $Re_p$ , qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les effets visqueux :

$$Re_p = \frac{d_p \cdot |\vec{U}_g - \vec{w}|}{\vartheta_g} \quad (\text{I.14})$$

Où  $\vartheta_g$  est la viscosité cinématique du gaz. Si  $Re_p \ll 1$ , condition remplie dans le cas des électrofiltres, lorsque les particules ont un diamètre inférieur à 20  $\mu\text{m}$ , le coefficient de traînée à l'expression suivante:

$$C_f = \frac{24}{Re_p} \quad (\text{I.15})$$

Dans cette situation, la force de frottement entre une particule sphérique et le gaz est donnée par la relation de Stokes :

$$\vec{F}_f = 3 \cdot \pi \cdot \eta_g \cdot d_p \cdot (\vec{U}_g - \vec{w}) \cdot \frac{1}{C_u(d_p, \lambda_g)} \quad (\text{I.16})$$

Où  $\eta_g$  est la viscosité dynamique du gaz. Si la dimension de la particule est comparable au libre parcours moyen  $\lambda_g$  des molécules du gaz, les particules vont se déplacer dans un milieu discontinu.

Dans ce cas, l'expression I.16 doit être corrigée par le facteur de **Cunningham** [29] :

$$C_u = 1 + 1,246 \cdot \frac{2 \cdot \lambda_g}{d_p} + 0,42 \cdot \frac{2 \cdot \lambda_g}{d_p} \cdot \exp(-0,87 \frac{2 \cdot d_p}{\lambda_g}) \quad (\text{I.17})$$

La figure I.8 montre la variation du facteur de Cunningham en fonction du diamètre des particules dans le cas de l'air ambiant ( $\lambda_g = 0,065 \mu\text{m}$ ). En remplaçant dans la relation I.11 l'expression de chaque force, la migration de la particule vers l'électrode de collecte suivant l'axe ( $O_y$ ) est caractérisée par la solution de l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dw_E}{dt} + \frac{3 \cdot \pi \cdot \eta_g \cdot d_p}{m_p \cdot C_u} \cdot w_E - \frac{q_p}{m_p} \cdot E = 0 \quad (\text{I.18})$$

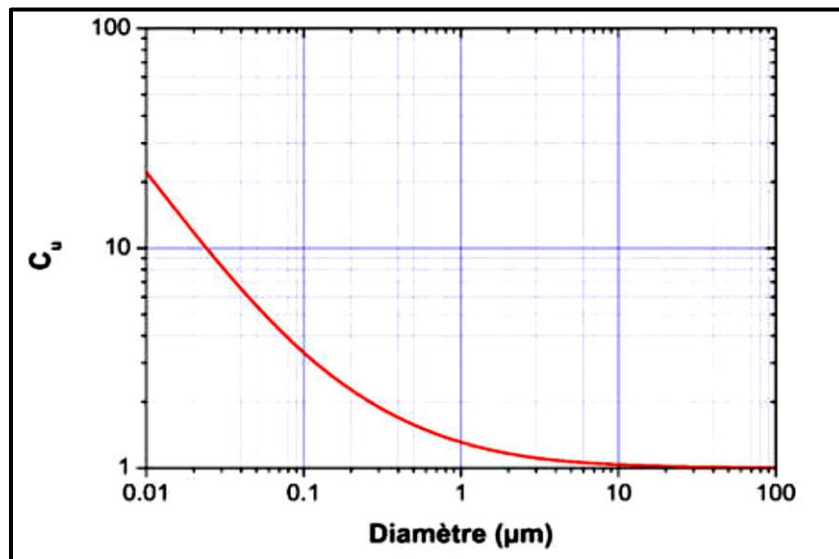
Où  $w_E$  est la composante de la vitesse d'une particule dans la direction normale aux plaques, qu'on appelle "vitesse effective de migration". Si on considère qu'au moment initial

$t=0$ , la vitesse  $w_E$  de la particule est nulle, la solution de l'équation I.18 donne l'évolution suivante au cours du temps :

$$w_E(t) = w_{th} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (\text{I.19})$$

Où  $w_{th}$  est appelée vitesse théorique de migration et a pour expression :

$$w_{th} = \frac{q_p \cdot E}{3 \cdot \pi \cdot \eta_g \cdot d_p} \cdot C_u \quad (\text{I.20})$$



**Figure I.8 :** Variations du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules ( $\lambda_g = 0,065 \mu\text{m}$ ) [22].

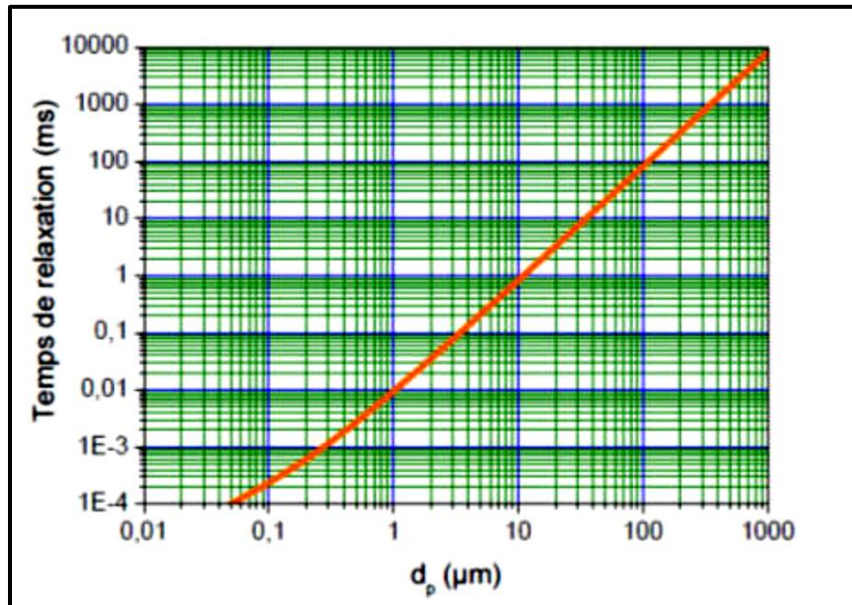
Dans la relation I.21  $\tau_p$  est le temps de relaxation de la particule considérée, qui dépend de la masse et de la taille de la particule, ainsi que de la viscosité dynamique du gaz porteur [19] [22] :

$$\tau_p = \frac{m_p}{3 \cdot \pi \cdot \eta_g \cdot d_p} \cdot C_u = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18 \cdot \eta_g} \cdot C_u \quad (\text{I.21})$$

Où  $\rho_p$  est la masse volumique des particules. Le temps  $\tau_p$  caractérise le comportement transitoire de la particule jusqu'au moment où elle se déplace à la vitesse constante  $w_{th}$ .

On remarque que le temps de relaxation est indépendant des conditions électriques à l'intérieur du filtre.

La figure I.9 montre les variations de  $\tau_p$  en fonction du diamètre des particules. Il faut noter que pour les fines particules ( $d_p \leq 1 \mu\text{m}$ ), ce temps est très faible ( $\tau_p \leq 10 \mu\text{s}$ ).



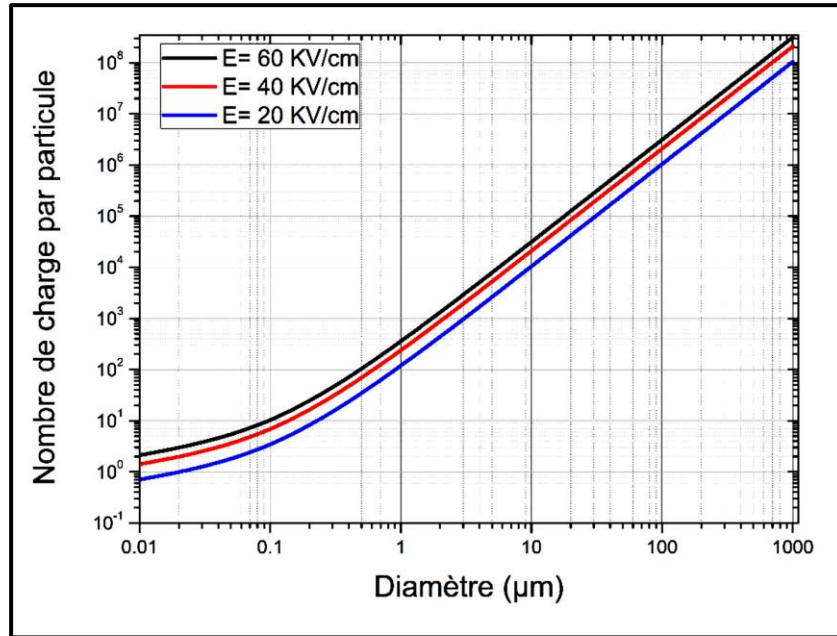
**Figure I.9 :** Variations du temps de relaxation en fonction du diamètre des particules ( $\eta g = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$  et  $\rho_p = 2.7 \text{ g/cm}^3$ ) [22].

La vitesse de migration théorique (équation I.20) représente, dans cette approche, la valeur stationnaire de la vitesse des particules dans la direction du champ électrique (perpendiculaire aux plaques collectrices) ; elle caractérise le processus de migration des particules à l'intérieur de l'électrofiltre. L'ensemble des modèles analytiques sont basés sur ce concept.

Une étude de la vitesse théorique de migration nécessite la connaissance de la charge électrique des particules en fonction de leur taille. Pour montrer la variation de  $w_{th}$  en fonction de la taille des particules, on utilise une relation simple de calcul de la charge, établie par **Cochet**. Cette relation donne la charge limite par champ d'une particule qui se trouve dans un champ électrique d'intensité  $E$ . Elle offre une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux pour  $d_p > 0,3 \mu\text{m}$  :

$$q_p^S = \left[ \left( 1 + \frac{2 \cdot \lambda g}{d_p} \right)^2 + \left( \frac{2}{1 + 2 \cdot \lambda g / d_p} \right) \cdot \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right] \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad (\text{I.22})$$

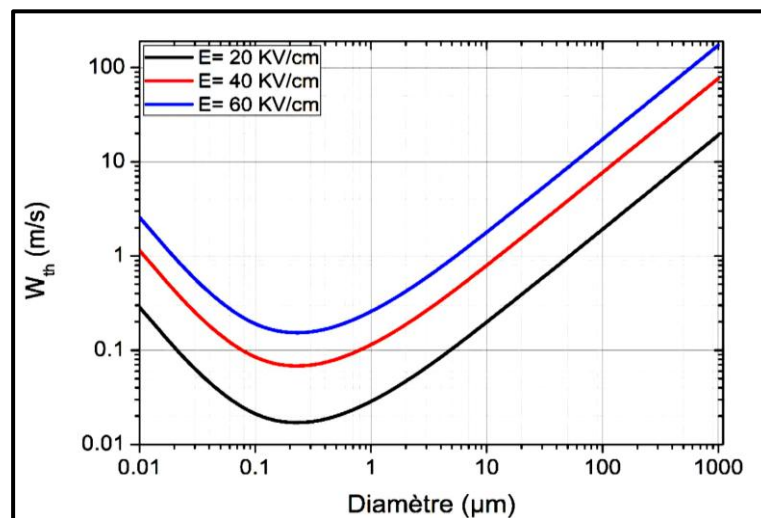
Où  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$  est la permittivité du vide et  $\epsilon_r$  est la constante diélectrique relative des particules. La figure I.10 montre les variations de la charge limite en fonction du diamètre des particules en considérant trois valeurs de l'intensité du champ électrique  $E$  [17] [22].



**Figure I.10 :** Variations de la charge des particules prédite par la relation de Cochet en fonction du diamètre des particules [19].

En utilisant les résultats de la figure I.10 sur la charge électrique des particules, on peut évaluer les valeurs de la vitesse théorique  $w_{th}$  (figure I.11).

La variation de la vitesse  $w_{th}$  en fonction du diamètre des particules passe par une valeur minimale pour  $d_p \cong 0.25 \mu\text{m}$ . Une faible vitesse de migration diminue le transport des particules vers les plaques collectrices et par conséquent l'efficacité de collecte. Ainsi donc, la vitesse de migration des particules étant à son plus bas niveau pour les tailles de particules comprises entre  $0.1 \mu\text{m}$  et  $1 \mu\text{m}$ , il en est de même en ce qui concerne l'efficacité de collecte [22].



**Figure I.11 :** Variations de la vitesse de migration théorique  $w_{th}$  en fonction de la taille des particules ( $\lambda_g = 0,065 \mu\text{m}$  et  $\eta_g = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ) [22].

## I.5. Collecte des particules

Les dispositifs électrostatiques utilisés pour la dépollution des gaz utilisent des forces électriques pour capter les particules. L'énergie électrique est donc nécessaire à leur fonctionnement. C'est alors tout naturellement que la question du rendement se pose. L'efficacité de collecte globale de tout système de traitement de gaz, en dépit de son type peut être déterminée grâce à la formule ci-dessous :

$$n_t = 1 - \frac{n_s}{n_e} \quad (\text{I.22})$$

Où  $n_e$  et  $n_s$  représentent respectivement, la concentration globale de particules à l'entrée et à la sortie du filtre. L'efficacité de collecte peut également être déterminée à partir du nombre et de la masse de particules.

### I.5.1. Paramètres influençant l'efficacité de collecte

L'efficacité de collecte dépend de la vitesse de migration et de la charge de la particule ainsi que du caractère turbulent de l'écoulement. D'autres processus peuvent influencer l'efficacité rendant son dimensionnement très difficile. Parmi ces phénomènes, la contre émission, le réentraînement, la concentration des particules et la turbulence jouent un rôle prépondérant.

#### I.5.1.1. Contre émission

La contre émission est un terme décrivant la décharge électrique locale sur une électrode normalement passive dans le système lorsque celle-ci est recouverte de poussières faiblement conductrices. Sous certaines conditions de tension et de courant, le dépôt isolant, se casse localement et un petit trou ou cratère se forme à partir duquel une décharge électrique apparait. Celle-ci réduit le rendement de collecte en abaissant la tension de claquage et en produisant des ions de signe opposé à la décharge principale, qui diminue la charge des poussières. Si la particule est conductrice, il y a peu de perturbation. Lorsque la conductivité baisse, les ions créés par décharge couronne commencent à être gênés par la résistance de la couche. Ceci entraîne une augmentation de la tension à travers le dépôt et une baisse correspondante au sein du gaz ce qui entraîne une baisse du courant. Si la conductivité est encore réduite, la tension à travers la couche continue d'augmenter jusqu'à créer une décharge diélectrique dans le dépôt ce qui correspond à l'initiation de la contre émission.



La chute de tension à travers la couche déposée suit la loi d'Ohm. Pour des résistivités des particules élevées ( $10^{11}$  ohm.cm), il se produit une chute de tension de plusieurs kilovolts dès que l'épaisseur de la couche atteint quelques millimètres. Dans ce cas, il se peut que l'effet couronne ne démarre pas car la différence de potentiel n'est plus suffisante.

Pour des résistivités inférieures à  $10^4$  Ohm.cm, l'agglomération des particules sur l'électrode réceptrice est négligeable et celles-ci sont ré-entraînées par le courant gazeux. Entre ces deux valeurs opératoires limites, plus la résistivité des particules est grande, plus l'électrofiltre est efficace.

### **I.5.1.2. Le réentraînement**

Le réentraînement intervient lorsque les particules déposées sur l'électrode collectrice se déchargent rapidement et donc ne sont plus le siège de la force électrostatique. Elles se détachent donc de l'électrode et sont emportées par l'écoulement. Il est difficile de retenir les poussières de résistivité de  $10^3$  à  $10^4$  ohm.cm. La résistivité peut être modifiée en jouant sur la température et l'humidité du gaz.

Ce phénomène de ré-envol peut être aussi dû à la contre émission qui détériore la couche de particules déposée. De plus, il peut être provoqué par une mauvaise répartition de l'écoulement et notamment par les effets de la turbulence. En effet, les grandes fluctuations du champ de vitesses du gaz affectent la diffusion turbulente des particules de telle sorte que l'efficacité de l'ESP décroît. Le ré-entraînement peut être supprimé par les mesures suivantes :

- L'injection d'agents adhésifs tels que l'ammoniaque, le sulfate d'ammonium ou les brunes d'huile,
- L'utilisation de filtre de type humide,
- Le nettoyage périodique de l'électrode de collecte par frappe ou brossage.

### **I.5.1.3. Les effets électro hydrodynamiques**

Le comportement des particules chargées dans un précipitateur électrostatique industriel est largement déterminé par le champ électrique ainsi que par l'écoulement principal et secondaire du gaz (vent ionique). De nombreuses investigations expérimentales sur l'origine de la turbulence et l'écoulement secondaire ont été réalisées. La turbulence est selon les auteurs, engendrée par différents phénomènes qui ont pour conséquence la modification de l'efficacité de l'ESP qui est fonction [30] [31]:

- Du profil de vitesse et de l'intensité de la turbulence.
- De l'intensité et de la distribution du champ électrique.
- De la taille et de la charge de la particule.
- Du caractère « non idéal » (rugosité des parois, inhomogénéité de la décharge couronne...).
- Du réentraînement des particules.
- Du vent ionique.

Il est généralement admis que la présence du vent ionique au sein des ESPs réduit leurs efficacités de collection en augmentant le taux de turbulence et donc la diffusion qui lui est associée.

### **I.6. Limites des électrofiltres à décharge couronne continue**

L'efficacité de collecte d'un électrofiltre à décharge couronne continue dépend essentiellement de la vitesse de migration des particules vers l'électrode de collecte. Les études théoriques et expérimentales des électrofiltres montrent que cette vitesse est à son plus bas niveau pour les tailles de particules comprises entre 0,1 et 1  $\mu\text{m}$ . Ceci s'explique par la contribution de deux facteurs [32] :

Si la dimension des particules est inférieure au libre parcours moyen  $\lambda_g$  des molécules du gaz, les particules vont alors se déplacer dans un milieu discontinu. Même avec une ou deux charges élémentaires par particule, la force de Coulomb domine la force de traînée corrigée par le facteur de Cunningham  $C_u$  ;

Pour les grosses particules ( $d_p > 1 \mu\text{m}$ ), la force de Coulomb ( $\alpha d_p^2$  avec le mécanisme de charge par champ) domine aussi la force de traînée.

### **I.7. Décharge Couronne**

#### **I.7.1. Historique**

Les premières publications sur l'effet de couronne datent de 1911 avec les travaux effectués par un des génies de cette époque, M. F. Peek. Depuis ce temps, un nombre impressionnant de travaux de recherche concernant l'effet de couronne sur les lignes aériennes de transport d'énergie électrique ont été effectués et publiés. Ces recherches portaient essentiellement sur les pertes par effet de couronne et l'interférence radiophonique [32].

### I.7.2. Définition

La décharge couronne est une décharge non-homogène en milieu gazeux au voisinage d'une électrode à faible rayon, à pression atmosphérique et en champ non-uniforme. Cette décharge se produit pour un champ électrique élevé, mais non-disruptif et se caractérise par une gaine lumineuse qui a donné lieu à l'expression d'effet couronne. Elle se développe, en général, depuis une électrode ayant un faible rayon de courbure.

Les géométries les plus courantes sont :

- Pointe / plan,
- Fil / cylindre (comme indiquée en figure I.12),
- Fil / plan,
- Sphère / plan, etc...

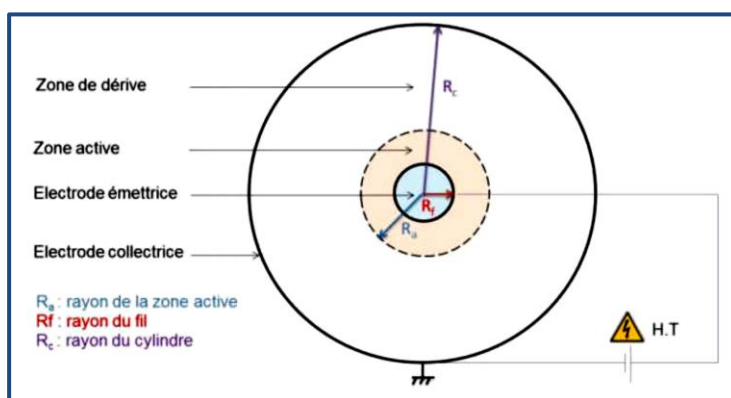
L'espace inter-électrodes est divisé en deux zones [19] [22] :

Une zone active d'ionisation où les charges sont créées et le champ électrique est élevé, une zone d'attachement et de recombinaison des électrons dans laquelle les charges dérivent dans un champ électrique plus faible que dans la zone active.

La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique qui dépendent de trois classes de paramètres :

Electriques tels que la nature et la polarité de la tension appliquée à l'électrode active. Géométriques tels que la forme, et les dimensions des électrodes ainsi que la distance inter-électrodes.

Physiques, liés à la nature du gaz inter-électrodes, à sa densité, à sa pression, à sa température et à sa teneur en vapeur d'eau et en impuretés. Le (ou les) matériau(x) constituant les électrodes jouent également un rôle non négligeable.



**Figure I.12 :** Représentation schématique de la décharge couronne (géométrie fil /cylindre) [19].

### I.7.3. Principe de la décharge couronne

Il existe toujours dans l'air un certain nombre d'électrons libres, créés par rayonnements cosmiques ou dus à l'ionisation naturelle par les substances radioactives dans la terre. Lorsque ces électrons sont soumis à un champ électrique élevé, ils sont accélérés, et si le champ est assez intense, l'énergie qu'ils acquièrent devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'ils heurtent. Il se crée alors de nouveaux électrons libres lesquels soumis au même champ, vont également ioniser des molécules et ainsi de suite; le processus prend une allure d'avalanche dite de Townsend. Pour qu'une telle avalanche puisse se maintenir, il faut qu'elle atteigne une taille critique, et que le champ ait une valeur suffisante [33].

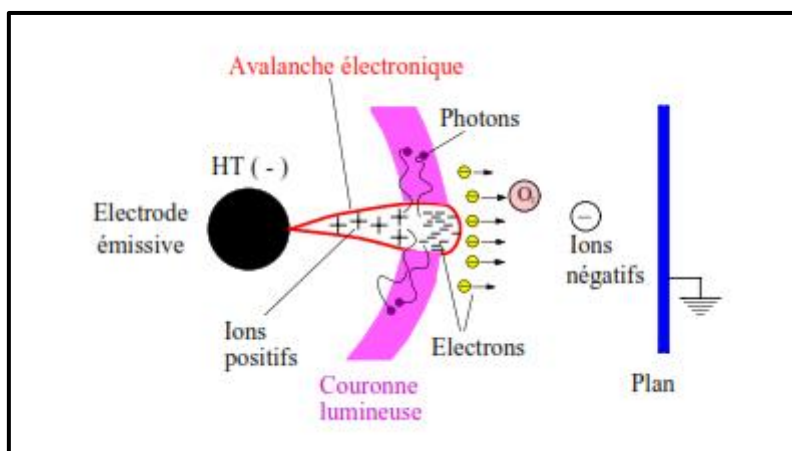
### I.7.4. Modes de décharge par effet couronne

Il existe deux types de décharge partielle, l'une en tension continue positive, l'autre en tension continue négative. La décharge sous tension alternative est une combinaison des deux précédentes.

#### I.7.4.1. Polarité négative

Dans le cas d'une décharge négative, l'avalanche électronique se développe de la cathode vers l'extérieur. Elle s'arrête au rayon critique  $r_0$ . Les électrons fournis par l'avalanche s'attachent aux molécules neutres de la zone de dérive pour former des ions négatifs. Les ions positifs se concentrent au voisinage immédiat de l'électrode active. Cette décharge présente l'inconvénient de produire des molécules d'ozone [34].

La figure I.13 montre les processus qui se produisent dans une décharge couronne négative à courant continu pour une géométrie fil- cylindre [19].



**Figure I.13** : Mécanisme de formation de la décharge couronne en polarité négative [19].

### I.7.4.2. Polarité positive

Pour une décharge positive, les avalanches électroniques prennent naissance dans zone interne au rayon  $r_0$  critique et se développent vers la cathode. Au-delà du rayon critique, il ne reste qu'un nuage d'ions positifs. Ces derniers beaucoup moins mobiles (400 fois moins mobiles que les électrons) ne peuvent pas générer une ionisation supplémentaire. La première manifestation lumineuse visible près de l'électrode. Lorsque la tension appliquée dépasse un certain seuil, une décharge lumineuse constituée de nombreux filaments apparaît au voisinage de la pointe. La durée totale du phénomène est de quelques centaines de nanosecondes, pendant lesquelles les streamers se propagent avec une vitesse de 10 à 100 cm/ $\mu$ s.

En polarité positive, les ions produisent une charge d'espace importante dans la zone de fort champ électrostatique, il en résulte un claquage plus rapide ainsi pour un gaz donné, la décharge électrique négative est la plus stable [19] [34].

### I.7.5. Champ critique de la décharge couronne

Pour déterminer le champ électrique (champ d'apparition de l'effet couronne) d'un conducteur cylindrique, Selon F.W. Peek l'effet de couronne est fonction du champ superficiel, du rayon du conducteur et de la densité de l'air [35] [36] [37]:

$$E_c = 31 \delta a. \left(1 + \frac{0,0308}{\sqrt{\delta a. r_f}}\right) \quad (I.24)$$

$$\text{Avec : } \delta a = \frac{3,92 . P}{273+t} \quad (I.25)$$

Tel que :

$E_c$  : champ critique en kV/cm ;

$\delta a$ : Densité relative de l'air ;

( $\delta a = 1$  pour  $P=76$  cm Hg et  $t=25^\circ$ ) ;

$R_f$ : rayon de conducteur en cm.

L'effet de couronne apparaît à une tension plus faible lorsque la température augmente. En effet, à pression constante, pour une température qui varie entre  $0^\circ$  et  $60^\circ\text{C}$  on obtient un champ critique différent soit : 44,18 kV/cm pour  $0^\circ\text{C}$  et 37,87 kV/cm pour  $60^\circ\text{C}$ .

Il est à noter que l'état de surface du conducteur est très important dans la détermination du champ électrique. La relation précédente ne se vérifie que pour des surfaces parfaitement polies. La rugosité superficielle diminue le champ critique, et on tient compte de cet effet en attribuant au conducteur un coefficient expérimental :  $m \leq 1$ , appelé coefficient de surface [34].

Une relation empirique simple entre le courant et la tension développée théoriquement est généralement utilisée dans la majorité des décharge couronne pour les différentes configurations. Elle s'exprime par [38] :

$$I = A(V - V_0) \quad (I.26)$$

Où :

$A$  : est une constante qui dépend de la configuration des électrodes, de la température, de la pression et de la composition du gaz ;

$V_0$ : représente la tension seuil d'ionisation ;

D'après Dupuy, pour une géométrie fil-cylindre la constante  $C$  est donné par la relation suivante :

$$A = \frac{8\pi\mu\epsilon_0}{rc \ln\left(\frac{rc}{rf}\right)} \quad (I.27)$$

$\mu$ : Mobilité ionique ;

$\epsilon_0$ : Permittivité du vide ;

$r_c$  : Rayon de la zone dérive ;

$r_f$  : Rayon du fil couronne ;

## 1.8. Modèles des précipitateurs électrostatiques selon leurs architectures

Lors du dimensionnement d'un électrofiltre, de nombreux paramètres sont pris en compte : la résistivité, la granulométrie et la nature des poussières, la concentration, la vitesse, la température et la composition de l'effluent gazeux, de même que les contraintes électriques. Ce sont autant de paramètres contraignants dont il faut tenir compte dans le cahier des charges final de conception [17] [35].

### 1.8.1. Précipitateurs secs

Les précipitateurs sont de géométrie simple et n'occasionnent que de faibles pertes de charge. Pour ce faire, ils sont recommandés pour traiter d'importants débits de gaz. Les précipitateurs secs comportent les éléments suivants : un caisson, des électrodes émissives (fils ou grille) et collectrices (plaques), des systèmes de battage des électrodes et d'extraction des poussières (souvent un frappage périodique des électrodes par marteaux), un dispositif de répartition des gaz. Parmi les précipitateurs secs on trouve les précipitateurs à un étage, et les précipitateurs à deux étages.

### 1.8.1.1. Précipitateurs à un seul étage

Les électrofiltres à un seul étage sont les plus utilisés dans les applications industrielles. L'ionisation et la collecte des particules sont réalisées simultanément tout au long de l'électrofiltre (Figure I.15)

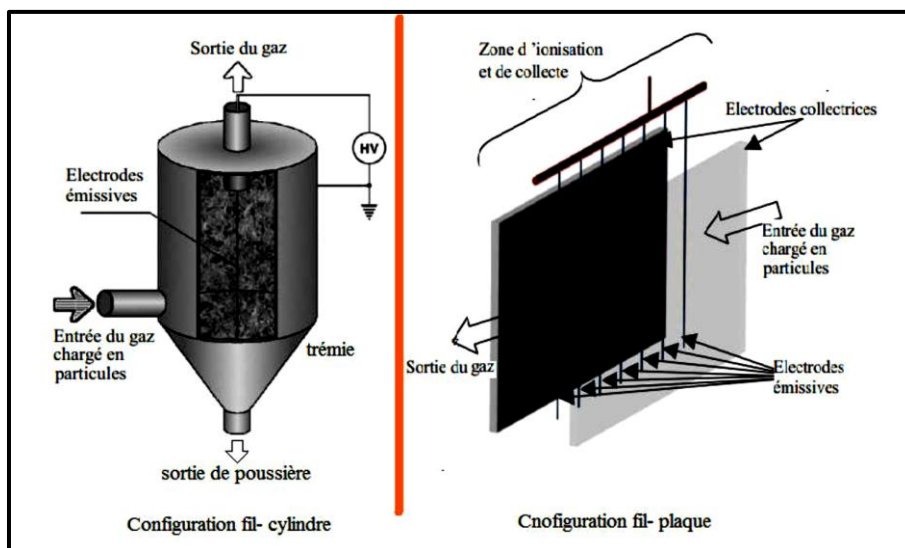


Figure I.15 : Précipitateur à un seul étage [17].

Les électrofiltres à un seul étage n'occasionnent que de faibles pertes de charge (50-100 Pa) et sont donc recommandés pour traiter les grands débits gazeux (80 000 m<sup>3</sup>/h par exemple). Le rendement d'épuration peut atteindre 99% pour des particules fines de l'ordre du micromètre. Le minimum d'efficacité apparaît pour des poussières de diamètre égal à 0,2 μm. Cependant le coût d'investissement est très élevé et la dépense électrique est de l'ordre de 1wh/m<sup>3</sup> traité.

Un précipitateur électrostatique peut être alimenté par une haute tension de polarité positive ou négative. Cependant, pour une configuration d'électrofiltre donnée, la valeur électrique de l'amorçage de la décharge couronne, ainsi que celle de claquage entre les électrodes sont plus grandes en polarité négative qu'en polarité positive. C'est la raison pour laquelle la polarité négative est souvent utilisée dans les électrofiltres en un seul étage.

### 1.8.1.2. Précipitateurs à double étage

Les filtres électrostatiques à double étage sont équipés d'un premier étage ionisant dans lequel les particules sont chargées suivi d'un filtre électrostatique proprement dit. Ils ont une construction plus compliquée ce qui conduit à des coûts de fabrication plus élevés. C'est

la principale raison pour laquelle ces appareils ont des dimensions réduites et sont utilisés principalement dans des installations de conditionnement d'air. Les deux étages d'un tel filtre sont alimentés séparément en tension ce qui nécessite en général une double source de haute tension [22] [39].

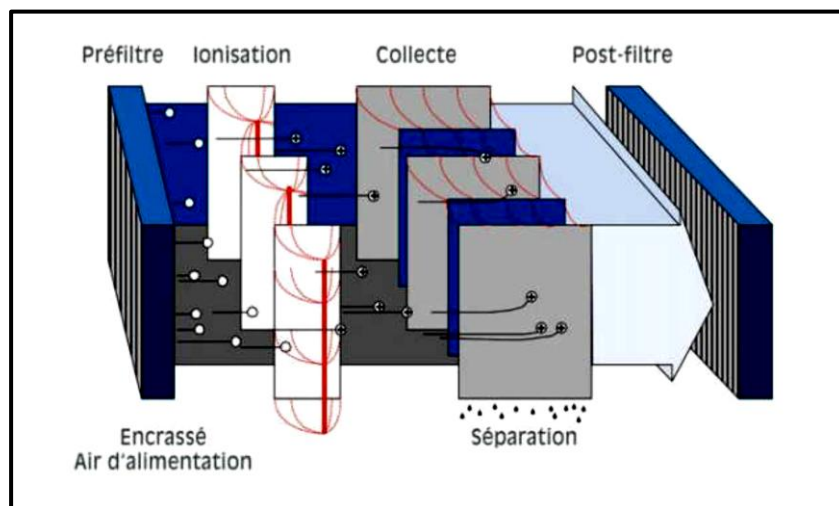


Figure I.16 : Précipitateur à deux étages [39].

Le premier étage constitue la zone d'ionisation, elle comporte des électrodes de décharge en forme de fil ou de tube. Les électrodes de collecte peuvent être soit des plaques parallèles, soit des cylindres coaxiaux. La figure I.16, présente une vue schématique d'un électrofiltre à deux étages ayant des électrodes de collecte sous forme de plaques. Ce type de précipitateur ne dispose pas de système de battage par frappe car le risque de ré-envol des poussières est trop important. La récupération des particules se fait souvent par lavage des électrodes. Afin d'avoir une production faible d'ozone, une haute tension de polarité positive est appliquée aux électrodes ionisantes.

### 1.8.2. Précipitateurs humides

Pour les précipitateurs électrostatiques classiques, il existe une valeur de la résistivité des particules au-delà de laquelle les performances de séparation sont notablement dégradées. Pour solutionner ce problème il y a ce qu'on appelle un précipitateur humide, dont le principe est le même que les précipitateurs secs, et la différence provient de la présence d'un film humide ruisselant sur l'électrode collectrice.

Ce genre de filtre utilise un film d'eau pour nettoyer le dépôt sur les surfaces des électrodes de collecte. Il présente des inconvénients imputables à la présence d'eau en leur



sein, mais également des avantages tels que l'amélioration du rendement de filtration, la suppression du phénomène de réentraînement des particules collectées et l'affranchissement des performances de séparation vis-à-vis de la résistivité des particules.

### I.9. Modèles des précipitateurs électrostatiques suivant leurs fonctionnements

Estimer l'efficacité de séparation d'un nouveau précipitateur électrostatique en vue de sa réalisation pratique reste encore un problème difficile. L'importance d'un dimensionnement correct représente finalement un problème économique car, entre le gabarit d'un filtre et son coût total de fabrication il y a une liaison très étroite.

Au cours du temps, de nombreux travaux ont été menés pour créer des modèles théoriques capables d'offrir des informations sur le rendement du fonctionnement de certaines installations.

Au début il y a eu des approches simples, semi-empiriques, qui ont leurs racines dans l'observation directe du fonctionnement des électrofiltres existants. Ce sont les modèles qu'on appelle analytiques ; ils permettent de décrire l'efficacité de collecte en fonction de paramètres géométriques, électriques et mécaniques. De nos jours, le développement des moyens de calcul a permis de développer des modèles numériques, basés sur la simulation des phénomènes produits au sein d'un électrofiltre.

#### I.9.1. Modèle laminaire

Le modèle analytique le plus simple du fonctionnement d'un électrofiltre considère un écoulement laminaire du gaz avec un profil de vitesse plat entre deux plaques parallèles portées à un potentiel électrique différent.

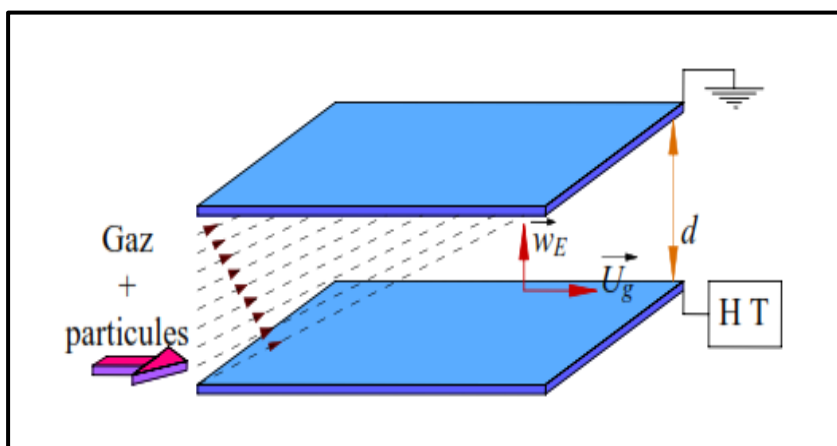


Figure I.17 : Illustration schématisée du modèle laminaire [35].

On admet que les particules en suspension dans le gaz ont toutes le même diamètre et la même charge électrique. Elles se déplacent dans la direction axiale avec la vitesse moyenne d'écoulement et subissent l'action du champ électrique. Les trajectoires sont donc des lignes droites déterminées par les vitesses  $U_g$  et  $w_E$ .

Les particules sont toutes collectées au bout d'une longueur  $L_D$  correspondant aux trajectoires des particules entrant à la distance  $d$  de l'électrode collectrice [19] [22].

$$L_D = U_g \frac{d}{w_E} \quad (\text{I.28})$$

Où  $U_g$  est la vitesse moyenne du gaz. Toutes les particules seront collectées à une distance égale ou inférieure à  $L_d$ . L'efficacité fractionnaire  $n_f$  de collecte peut être alors calculée par la relation suivante :

$$n_f = \min \left[ \frac{w_E(d_p \cdot e \cdot q_p)}{U_g \cdot d}, 1 \right] \quad (\text{I.29})$$

Ce schéma est très éloigné de la réalité. Il y a d'abord les conditions électriques qui peuvent être très différentes de celles admises ici : particules chargées instantanément se déplaçant dans un champ électrique uniforme.

Mais l'hypothèse la plus critiquable est celle d'un écoulement laminaire du gaz avec un profil plat de la vitesse. Cependant, dans le cas de certains précipitateurs électrostatiques à double étage, ce modèle peut constituer le point de départ de l'étude sur la collecte des particules.

### I.9.2. Modèle de Deutsch

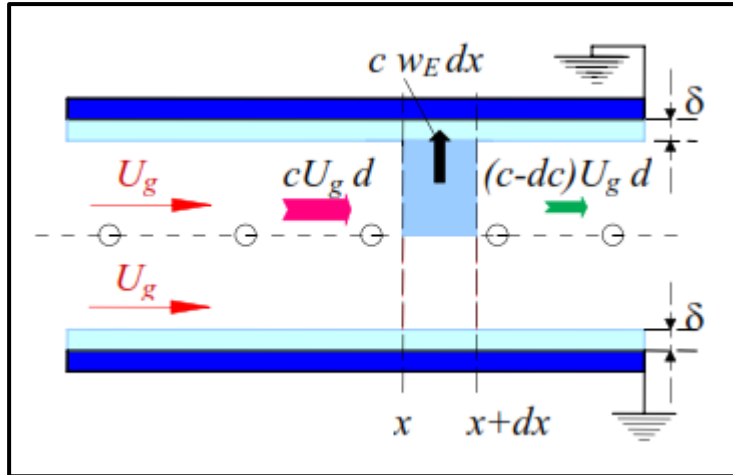
Dans les précipitateurs électrostatiques l'écoulement est presque toujours turbulent. En 1921, Deutsch a développé le premier modèle théorique permettant d'estimer les valeurs d'efficacité de collecte. Aujourd'hui ce modèle fait toujours référence. Son développement est basé sur les hypothèses simplificatrices détaillées ci-dessous.

Deutsch distingue deux zones dans le filtre électrostatique [22] [35]:

Le cœur du précipitateur, où la concentration des particules est considérée uniforme dans toute section transversale et où la vitesse moyenne d'écoulement est supposée constante ;

Une couche limite laminaire d'épaisseur  $\delta$  près des parois où la diffusivité turbulente est nulle ; les particules entrant dans cette couche limite sont toutes collectées. La vitesse de migration est supposée constante dans cette couche.

Nous considérons deux sections transversales situées à une distance  $x$  l'une de l'autre, dans la direction d'écoulement du gaz (Figure I.18) [35].



**Figure I.18** : Schéma des couches laminaires et du bilan massique de particules sur une longueur élémentaire  $dx$  (Modèle de Deutsch ) [22] [35].

Dans le volume  $d_x.h.d$ , où  $h$  représente la hauteur des plaques, on distingue :  $c.u_g.h.d$  le flux des particules qui entrent par la section située à l'abscisse  $x$ ,  $(c + dc) \cdot h.u_g.d$  le flux des particules non collectées sortant par la section située à l'abscisse  $x+dx$  et le flux de particules captées sur la longueur  $dx$  ( $c w_E.h.dx$ ). Par un bilan massique, on trouve :

$$c \cdot U_g \cdot h \cdot d = (c + cd) \cdot h \cdot U_g \cdot d + c \cdot w_E \cdot h \cdot dx \quad (\text{I.30})$$

En intégrant sur toute la longueur  $L$  du filtre, on obtient la relation entre la concentration des particules à l'entrée et celle à la sortie du précipitateur :

$$C_s(d_p) = C_s(d_p) \cdot \exp \left[ \frac{w_E(d_p)^{-L}}{d \cdot U_g} \right] \quad (\text{I.31})$$

Ce qui conduit à la formule de Deutsch-Anderson :

$$n_f(d_p) = 1 - \exp \left[ \frac{w_E(d_p)^{-L}}{d \cdot U_g} \right] = 1 - \exp \left[ w_E \cdot (d_p) \frac{S}{D_g} \right] \quad (\text{I.32})$$

Où  $S$  est la surface totale des électrodes collectrices et  $D_g$  est le débit volumique du gaz. Le modèle de Deutsch ignore tous les phénomènes qui peuvent diminuer le rendement de collecte, comme le réentraînement des particules collectées par le flux gazeux, l'influence de la charge d'espace des particules sur la décharge couronne.

## I.10. Nouvelles technologies des précipitateurs.

### I.10.1. Précipitateur à barrière diélectrique (DBD)

Les recherches réalisées dans le domaine de la filtration électrostatique ont abouti au développement de géométries de plus en plus complexes. Les électrofiltres dits par décharges

à barrière diélectrique consistent à interposer un matériau diélectrique entre les deux électrodes, afin de limiter la formation d'arcs électriques néfastes au fonctionnement [19].

### **I.10.2. Electrofiltres à électrode mobile**

La technologie du précipitateur à électrode mobile a été créée pour répondre au besoin industriel. Le déplacement de l'électrode de collecte recueille la poussière en permanence et la rotation de la brosse située dans la partie inférieure élimine la poussière déposée sur la surface d'électrode (tapis roulant).

Cette zone est une zone de non-recouvrement qui est exempt de flux de gaz ou d'électricité (haute tension). La poussière collectée est complètement enlevée par ces brosses rotatives, ainsi que les plaques collectrices sont maintenues propres en tout temps. En outre, le réentraînement ne peut pas se produire par le brossage de particules [17].

D'autre part, des pièces telles que la chaîne et les pignons qui se déplacent l'électrode sont exposés à un environnement fortement poussiéreux ce qui va poser beaucoup de problèmes mécanique donc un dysfonctionnement dans le processus de récupération des particules.

### **I.10.3. Dépoussiéreur électrostatique type tube rotatif**

Le précipitateur électrostatique à tube rotatif est utilisé pour collecter les goudrons à haute viscosité générés par les fours de cuisson à électrode de carbone ou les procédés de fabrication du coke, de l'asphalte ou des matériaux réfractaires ou des brouillards d'huile générés par le caoutchouc, les pneus, etc. L'électrode collectrice de poussière du précipitateur électrostatique à tube rotatif est combinée avec le boîtier extérieur et tourne lentement en tant que four rotatif. Les grattoirs installés sur les surfaces internes du tube raclent continuellement le goudron à haute viscosité qui s'accumule sur l'électrode collectrice sur toute la surface du tube. Par conséquent, ceci convient à la collecte d'aérosols qui sont difficiles à traiter avec un précipitateur électrostatique de type sec conventionnel.

### **I.10.4. Précipitateur hélicoïdale**

Il s'agit d'une nouvelle configuration applicable à la précipitation de la matière particulaire à petite échelle. Le gaz de combustion est conduit à travers un canal d'écoulement constitué de deux hélices coaxiales et d'un tube. Grâce à l'intérieur, un plus petit potentiel négatif hélicoïdal est fourni, tandis que l'hélice extérieure plus grande et le tube servent de

surfaces de collecte. En outre, la plus grande hélice est destinée à fonctionner comme une vis de transport pour exporter la poussière des surfaces du tube .

### **I.10.5. Nouveaux précipitateurs a courant continue**

#### **I.10.5.1. Précipitateur fil-plaque**

L'électrofiltre fil-plaque, une nouvelle configuration différente de la version traditionnelle, la direction du fil est parallèle au flux d'air.

#### **I.10.5.2. Précipitateur à fils attachés aux plaques diélectriques**

Les fils de décharge sont attachés aux plaques diélectriques. Le flux d'air et les particules pourraient endommager les fils placés dans le canal. Si le fil est attaché à une plaque diélectrique, il pourrait être mieux protégé. Le nouveau type d'ESP pourrait avoir une plus grande efficacité pour les petites particules (0,01-1  $\mu\text{m}$ ), un courant de décharge plus faible et la production d'ozone.

#### **I.10.5.3. Précipitateur fil-à-cylindre**

Ce type d'ESP utilise un cylindre conducteur comme électrode de collecte. Le cylindre peut tourner dans le processus de précipitation et la couche de poussière déposée sur la surface

du cylindre est uniforme, ce qui permet d'éviter l'effet back-corona qui affecte l'efficacité de collecte. La brosse stationnaire pourrait être placée près du cylindre et enlever la couche de poussière.

#### **I.10.5.4. Précipitateur à plaque perforé**

Cette nouvelle configuration utilise une plaque perforée comme électrode de collecte, montée perpendiculairement à la direction de l'écoulement d'air. La plaque perforée pourrait capturer certaines particules même non chargées.

### **I.11. Conclusion**

L'objectif de ce chapitre est d'apporter une contribution à la compréhension des différents phénomènes qui régissent le fonctionnement des précipitateurs électrostatiques.

On s'est intéressé dans un premier temps à poser la problématique la plus en vue au monde en ce moment, et qui est la pollution atmosphérique. On a évoqué les sources de sa

formation, les caractéristiques et les dimensions de la pollution particulaire dans l'air et surtout ses conséquences sur la santé humaine.

On a passé en revue l'ensemble des techniques les plus efficaces pour lutter contre cette pollution comprenant une synthèse détaillée sur les précipitateurs électrostatiques. En dernier lieu, on a essayé de schématiser les concepts fondamentaux de la précipitation électrostatique, on s'est particulièrement intéressé aux mécanismes de charge des particules en suspension, leur vitesse de migration ainsi que les différents modèles de fonctionnement des électro-filtres.

# **Chapitre II**

---

## **Matériel et Méthodes**

## *Chapitre II*

### *Matériel et Méthodes*

#### **II. 1. Introduction**

Ce chapitre expose la procédure expérimentale que nous avons choisie pour filtrer différentes matières polluantes (microniques et submicroniques) et d'en évaluer le rendement traduisant ainsi l'efficacité du procédé. Pour cette raison nous détaillerons dans la suite les points suivants :

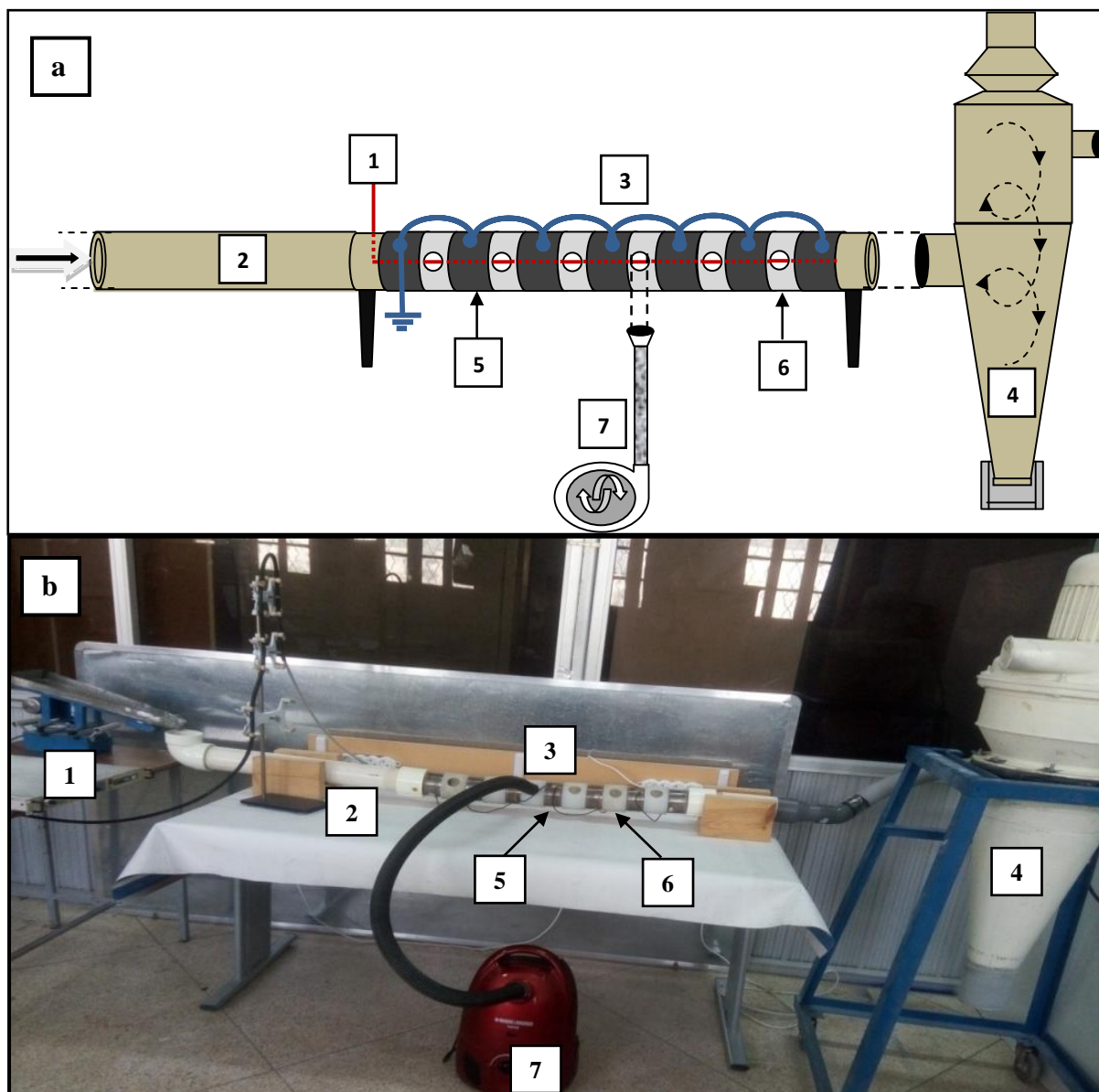
- Différents échantillons de particules considérés comme polluants.
- Matériel exploité pour ces expériences à commencer par le précipitateur électrostatique, les équipements d'expérience qui complètent le fonctionnement de filtrage ainsi que divers équipements de mesure employés depuis l'injection de la matière jusqu'à la collecte puis l'estimation du rendement.
- Méthode optée pour assurer l'efficacité de cette épuration. Pour une meilleure approche avec le monde industriel, nous avons décrit le déroulement de cette procédure sous forme de phases séquentielles.

Dans un souci d'optimiser le rendement de ce procédé, nous avons élaboré deux protocoles complémentaires qui seront intitulés « **Pilote 1** » pour le banc d'essai conçu au sein du laboratoire APELEC de Sidi Bel Abbès et « **Pilote 2** » pour le banc d'essai utilisé au niveau du centre de recherche CNRS Grenoble – France.

#### **II. 2. Description du banc d'essai « pilote 1 »**

Le montage expérimental utilisé dans ce travail est constitué d'un précipitateur électrostatique cylindrique réalisé d'une façon particulière, afin qu'on puisse analyser la distribution de la charge et du courant à travers toute sa longueur. Notre banc d'essai comporte aussi un filtre cyclone, une source haute tension, et des appareils de mesure comme il est indiqué sur la figure II.1.





**Figure II.1:** Dispositif expérimental du système proposé

a) Schéma descriptif du banc expérimental ; b) photo réelle du banc expérimental

1. Alimentation haute tension,
2. Tube en PVC ,
3. Précipitateur réalisé,
4. Cyclone,
5. Portion en métal,
6. Portion en polyamide,
7. Aspirateur.

Le précipitateur réalisé est composé d'un cylindre métallique horizontal relié à la terre de diamètre interne ( $D$ ) de 9 cm et de longueur ( $L$ ) de 80 cm (Electrode collectrice),

ainsi que d'un fil en acier inoxydable de 0,3 mm de diamètre, suspendu à son axe à l'aide de supports isolants, il est alimenté par une haute tension continue négative fournie par un générateur de haute tension (Spellman SL600, 9 mA).

L'échantillon de particule utilisé dans nos expériences est préparé en utilisant un tamis vibreur de marque (FRITSCH 50 W), et une balance numérique d'une précision de 0,01 g.

Le fluide gazeux contenant les particules polluantes est introduit dans l'ESP grâce à un vibro-transporteur via un tube en PVC et circule dans le précipitateur à travers l'intervalle inter-électrodes.

L'électrode collectrice mise à la terre est constituée de sept portions cylindriques en acier d'un rayon interne de 4,5 cm et d'une longueur de 7 cm. Ces électrodes sont isolées les unes des autres en utilisant six portions cylindriques de polyamide (PTFE) de même rayon que les portions métalliques égal à 4,5 cm et d'une longueur de 5 cm. Chaque portion isolante en PTFE a une ouverture circulaire de 2,5 cm de diamètre qui permet l'introduction du tube à un aspirateur (Samsung, 1,6 kW) pour l'aspiration d'une quantité de particules qui traversent le précipitateur pendant son fonctionnement. Un tube en PVC de même rayon interne de 4,5 cm et de longueur de 60 cm a été placé en amont de l'électrode collectrice de sorte que le flux de gaz soit homogénéisé et presque laminaire à travers l'ESP.

Un filtre à cyclone (débit max=150 m<sup>3</sup>/h) contrôlé par un variateur de vitesse électronique aspire le mélange (fluide+particules) afin de faire circuler l'air pollué à travers l'ESP et récupérer les particules non filtrées.

Pour la mesure de la charge électrique des particules collectées, on emploie un électromètre sensible (modèle 6415, Keithley Instruments) qui est relié à une cage de Faraday.

Dans le § II.2.2 on explique le mode de réalisation de quelques équipements considérés importants dans le montage ainsi que leurs fonctionnements

### **II.2.1. Description du précipitateur électrostatique**

Ce dispositif a été conçu pour répondre à un besoin de recherche particulier, concernant l'extraction des particules polluantes dans différentes zones à travers la longueur du précipitateur. Pour sa conception on a procédé à la fabrication des constituants suivants :

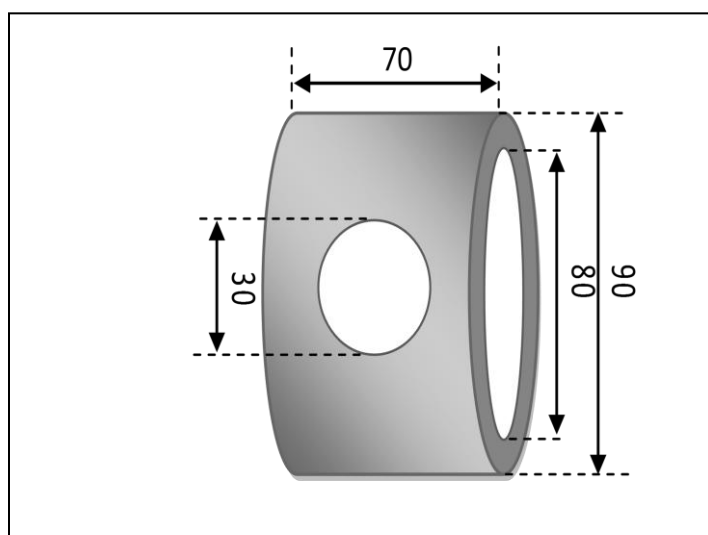
#### **II.2.1.1. Parties isolantes**

Les parties isolantes (en nombre de six pièces) sont des portions cylindriques creuses

en polyamide de diamètre externe égal à 90 mm et interne égal à 80 mm, de longueur 70 mm.

Ces pièces ont été usinées à l'aide d'un tour manuel à partir d'un bloc de polyamide qui est un plastique présentant une grande rigidité et la capacité de supporter des températures élevées car c'est une matière ininflammable.

On pratique un filetage interne de largeur égale à 10 mm sur les deux extrémités des pièces permettant ainsi un assemblage adéquat avec les électrodes collectrices. En plus un trou de 30 mm de diamètre a été percé au milieu de chaque pièce servant à l'introduction du tube de l'aspirateur. La figure II.2 indique l'aspect et les dimensions de ces pièces.



**Figure II.2 :** Dimensions des portions isolantes (en mm)

#### II.2.1.2. Electrodes collectrices

Les électrodes collectrices (en nombre de sept pièces) sont des portions métalliques creuses de forme cylindrique de diamètre externe égal à 90 mm et interne égal à 80 mm et de longueur de 50 mm.

On pratique un filetage externe de largeur égale 10 mm sur les deux extrémités des pièces permettant ainsi un assemblage adéquat avec les portions isolantes. Chaque pièce a subi un polissage externe et interne sur toute sa surface pour éviter tout problème de micro décharge.

La figure II.3 montre l'aspect et les dimensions de ces pièces.

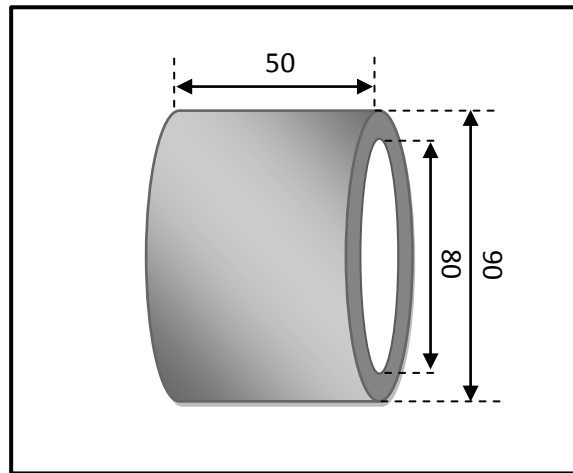


Figure II.3 : Dimensions des portions conductrices (en mm)

### II.2.1.3. Assemblage

Le montage du dispositif consiste à assembler toutes les pièces finalisées en alternant une pièce métallique avec une autre isolante. On place sur chaque extrémité du tube ainsi obtenu un petit bâtonnet en plexiglas servant de support de fixation qui une fois percés au milieu va faciliter le passage de part et d'autre d'un fil conducteur en acier de diamètre  $d_f = 0,3$  mm. Une fois ce fil tendu et bien fixé, il aura pour rôle de charger par effet couronne les particules traversant le tube dès son alimentation par une haute tension négative.

La figure II.4 illustre le précipitateur électrostatique réalisé.

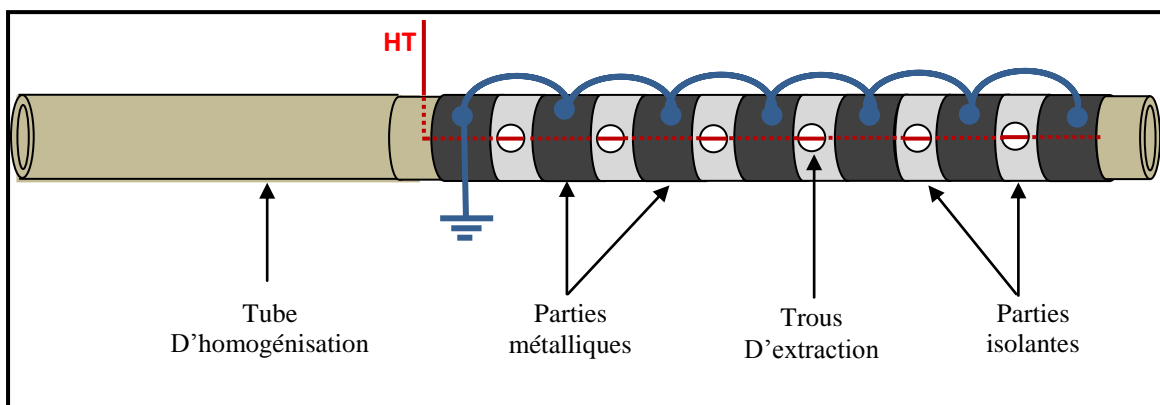


Figure II.4 : Schéma représentatif du précipitateur électrostatique réalisé

### II.2.2. Equipements utilisés

Ces équipements représentent les appareils reliés au précipitateur électrostatique (ESP) et qui ont pour fonction l'injection de la matière polluante et les opérations de collecte. Nous exposons dans ce qui va suivre des descriptions élémentaires de ces équipements.

### II.2.2.1. Filtre mécanique (cyclone)

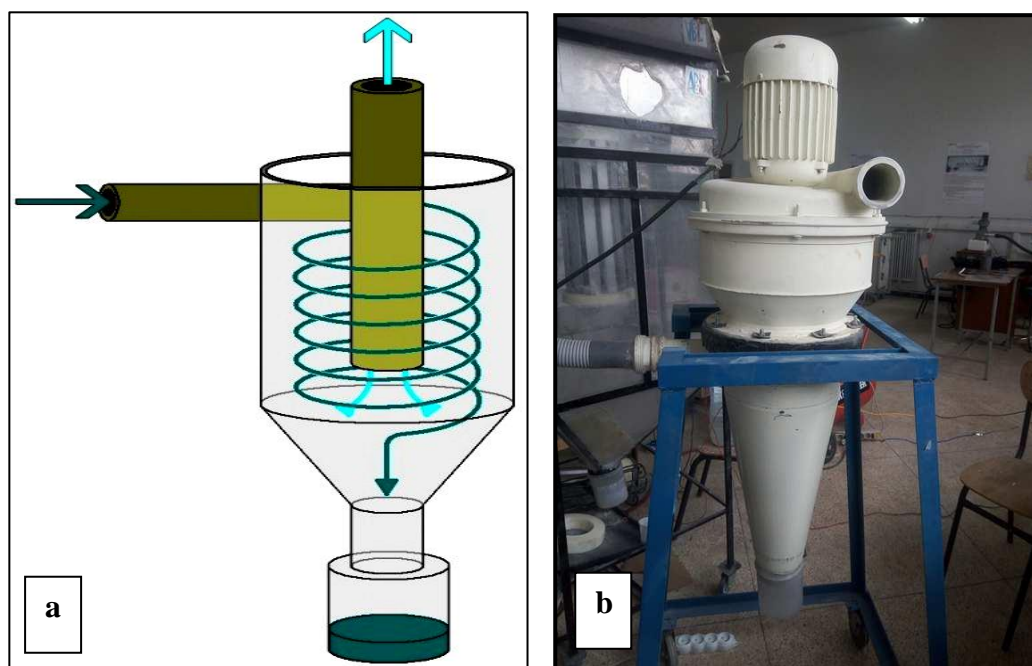
Les cyclones sont utilisés comme pré-dépoussiéreurs, ils conviennent rarement seuls pour résoudre les problèmes actuels de dépoussiérage car ils sont inopérants sur la tranche la plus fine des poussières et peu efficaces en dessous des particules  $P_{10}$ .

Leur principe de fonctionnement est basé sur l'arrivée du mélange air-déchet par la bouche d'entrée qui est mis en rotation immédiatement, du fait de la courbure de la paroi.

Le tourbillon créé transmet aux particules solides une énergie cinétique qui tend à plaquer les déchets les plus grossiers contre la paroi du cylindre, quant aux filets d'air, ils se dirigent vers le tourbillon ascensionnel qui s'est formé à l'intérieur du cylindre à cause de la différence de pression existant entre celle du cyclone et celle de l'atmosphère. L'efficacité d'un cyclone est d'autant meilleure, pour une même série d'appareil, que :

- La masse volumique des poussières est plus importante.
- Le diamètre des particules est grand.
- Le diamètre du cyclone est plus petit.
- La concentration en poussière est importante.
- La viscosité des gaz est faible.

La Figure II.5.a représente un schéma descriptif d'un filtre mécanique à cyclone tandis que la figure II.5.b montre la photographie du cyclone utilisé durant nos manipulations.



**Figure II.5 :** Filtre mécanique à cyclone

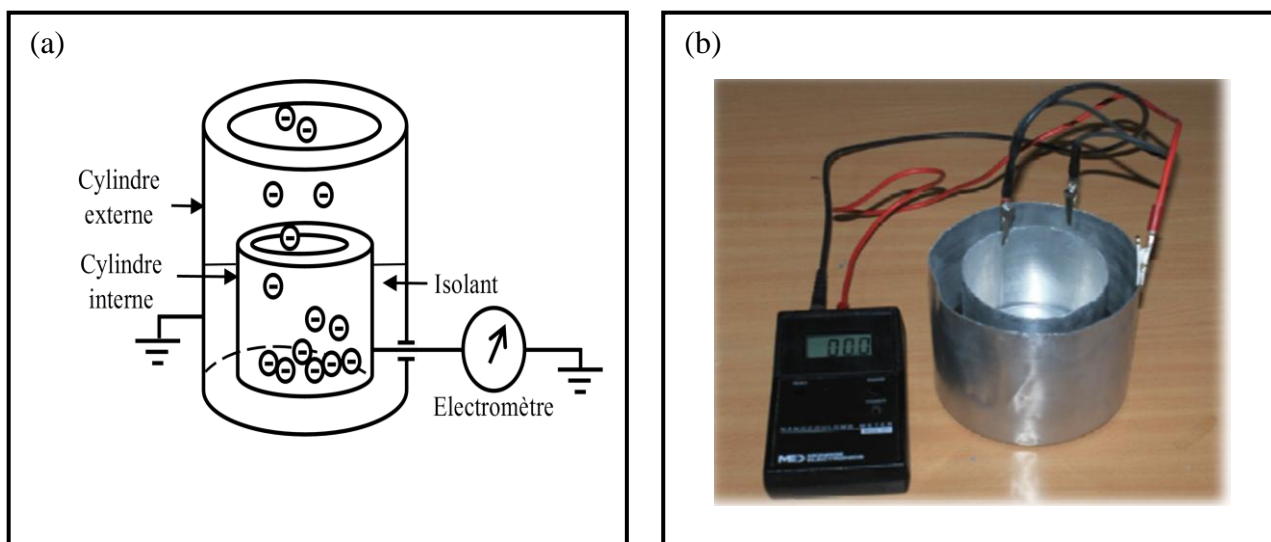
a) Schéma descriptif d'un filtre mécanique à cyclone. b) Photo réelle du cyclone utilisé.

### II.2.2.2. Cage de Faraday

Afin de permettre la mesure de la charge électrostatique des particules, on s'est intéressé à la réalisation d'une cage de Faraday et pour cela nous nous sommes procurés deux cylindres métalliques creux de tailles différentes. Ces deux cylindres sont séparés l'un par rapport à l'autre par une matière isolante, dans notre cas nous avons utilisé de la résine ICTHANE de couleur noire.

Le cylindre externe est relié à la terre et joue le rôle de blindage contre les parasites externes. La cage de Faraday réalisée est illustrée sur la figure II.6.

Pour la mesure de la charge des particules, on dépose l'échantillon granulaire à l'intérieur du petit cylindre et à l'aide d'un électromètre (modèle 6415, Keithley Instruments) on relève la charge électrostatique.



**Figure II.6 :** Cage de Faraday

a. Schéma descriptif d'une cage de Faraday

b. Photographie réelle de la cage de Faraday réalisée

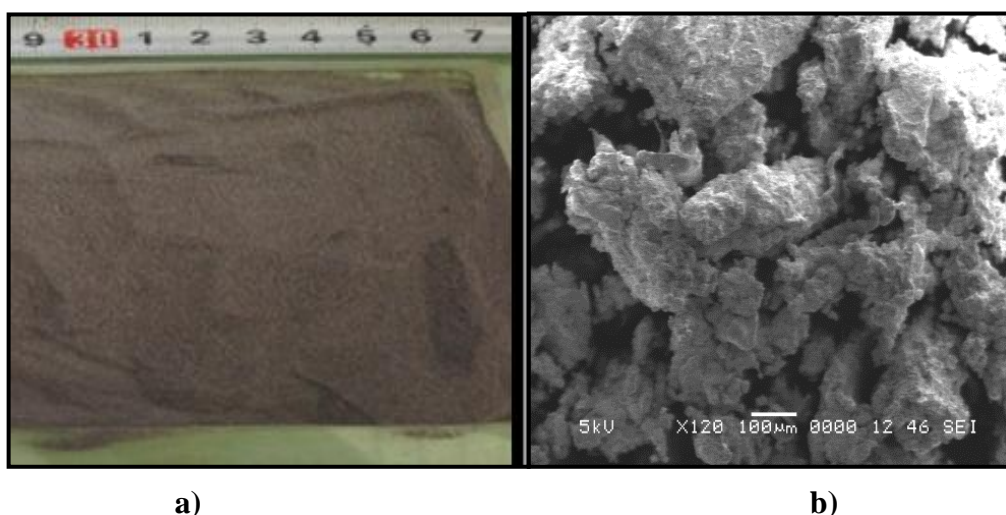
### II.2.3 Echantillons de particules

Pour cette première expérience notre choix s'est porté sur les particules de PVC en poudre d'une taille granulométrique de 100  $\mu\text{m}$ . Le sigle venant de l'appellation Anglaise « Polyvinyl chloride ». Il s'agit d'un polymère thermoplastique de grande consommation préparé de deux matières premières : à 57% de sel de mer (NaCl) et 43% de pétrole. Le PVC se présente en poudre blanche, celle-ci doit être additionnée de produits tels que : stabilisants, lubrifiants, plastifiants, pigments, charges, permettant sa transformation en objets finis. De ce

fait le PVC peut être rigide, souple, transparent, opaque, incolore, teinté, compact ou cellulaire. Quant à ses propriétés physico- chimique, le PVC est nommé (Poly Chlorure de Vinyle). Sa formule brute est  $(C_2H_3Cl)_n$  où  $n$  varie de 700 à 1500. Sa température de fusion est supérieure à  $180\text{ }^\circ\text{C}$ , sa masse volumique est de  $1.38\text{ g/cm}^3$  tandis que sa constante diélectrique est égale à 3.39 ( $1\text{ kHz} - 25\text{ }^\circ\text{C}$ )

Le PVC présente un impact sur l'environnement car :

- La polymérisation du PVC est irréversible, certains plastifiants entrant dans sa composition peuvent présenter un risque majeur pour la santé.
- Le PVC permet l'utilisation du chlorure rejeté lors de la fabrication de produits tels que le savon, la lessive, c'est aujourd'hui l'une des solutions pour éviter le stockage important et dangereux du chlorure.
- Le PVC est soupçonné de contribuer :
  - Aux pluies acides.
  - Aux rejets des dioxines et furanes suite à sa combustion.
  - Aux cancers, le CIRC a placé ce polymère dans le groupe 3.
- Dégager de l'acide chlorhydrique, c'est le cas des usines d'incinération des ordures ménagères qui doivent être munies de filtres antiacide pour éviter l'atteinte de l'environnement. La figure II.7 représente une photographie réelle de la poudre PVC utilisée lors de nos expérimentations.



**Figure II.7 :** Photographie des particules de PVC

a) Image capturée par appareil photo.

b) Image obtenue par microscope (zoom: 120 fois).

---

## II.2.4 Description de la procédure expérimentale

Dans cette partie du chapitre, nous allons décrire en détail la procédure expérimentale menée pour exploiter le précipitateur électrostatique dans différents tests en utilisant l'échantillon granulaire de PVC et les équipements préalablement décrits.

### Phase 1 : Préparation des expériences

La préparation des expériences est obligatoire et inclut les étapes suivantes :

**1.1** Relever les mesures de la température et de l'humidité environnant le dispositif expérimental et ceci en utilisant un thermohygromètre.

**1.2** Brancher tous les équipements annexes au module ESP à savoir le vibro-transporteur et le générateur de haute tension. Pour l'aspirateur, connecter son tube sur l'un des trous de collecte situé sur la portion en polyamide en veillant à son étanchéité et enfin brancher aussi le cyclone.

**1.3** Préparer les appareils de mesure par calibrage et étalonnage si c'est nécessaire et les connecter au montage.

### Phase 2 : Préparation de l'échantillon de particules

La préparation de l'échantillon de particules nécessite les opérations suivantes :

**2.1** Prendre une quantité de matière PVC et la passer au tamis vibreur plusieurs fois afin de récupérer des particules de même diamètre ( $d_p=100 \mu\text{m}$ ).

**2.2** A l'aide d'une balance, peser une quantité de matière égale à 50 g considérée comme échantillon utilisé pour toutes les expériences.

**2.3** Etaler cette poudre sur une plaque métallique reliée à la terre afin de neutraliser la charge des particules.

**2.4** Introduire cet échantillon dans la cage de Faraday qui est reliée à un électromètre et mesurer sa charge électrostatique initiale.

### Phase 3 : Déroulement des essais expérimentaux

Le protocole de mesure passe par les étapes suivantes :

**3.1** Déposer l'échantillon de matière préalablement déchargé sur le vibro-transporteur, mettre en marche ce dernier puis fixer à l'aide d'un potentiomètre la fréquence du variateur à une valeur du débit d'air. Les particules vont acquérir par vibration un mouvement les introduisant à l'entrée de l'ESP.



**3.2** Alimenter le précipitateur électrostatique par une haute tension de polarité négative délivrée par un générateur de haute tension créant ainsi une décharge couronne dans l'espace inter- électrodes.

**3.3** Une fois l'expérience terminée, éteindre le générateur de haute tension ainsi que l'aspirateur et le cyclone.

**3.4** Récupérer minutieusement les particules collectées dans l'aspirateur et le cyclone.

#### **Phase 4 : Protocole de mesure**

Le protocole de mesure passe par les étapes suivantes :

**4.1** Introduire la poudre collectée à partir de l'aspirateur dans la cage de Faraday et relever sa charge massique en utilisant un électromètre et une balance électrique.

**4.2** Procéder de même pour la poudre cumulée dans le filtre mécanique (cyclone).

#### **Phase 5 : Compléments des essais**

**5.1** Répéter chaque essai expérimental relatif à un trou de récupération choisi, trois fois de suite dans les mêmes conditions de tests afin de minimiser au maximum les erreurs dues aux phénomènes aléatoires et assurer par cette répétabilité la fiabilité des résultats.

**5.2** Continuer les autres essais expérimentaux en passant par les quatre (04) phases précédentes pour des tensions d'alimentation variant de (8 kV) à (16 kV).

**5.3** L'ensemble des mesures obtenues est porté dans des tracés qui vont subir une analyse du phénomène de la charge des particules le long du précipitateur sujet du chapitre quatre (IV).

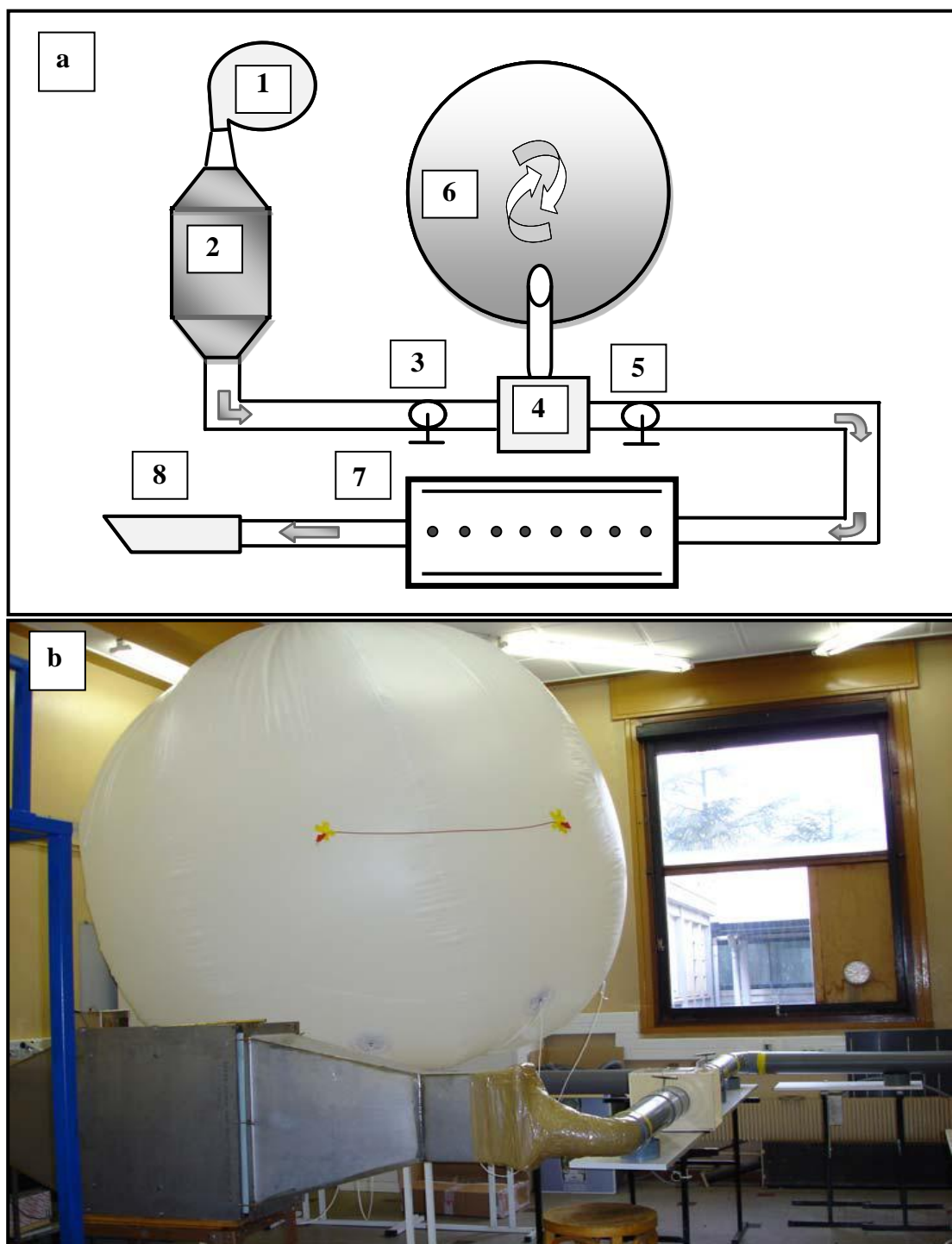
**5.4** Purifier le dispositif expérimental en commençant par le soufflage et le battage du précipitateur puis le nettoyage du plateau vibro-transporteur ainsi que la vidange du sac de l'aspirateur et du cyclone afin d'éliminer toute trace d'impureté.

### **II. 3. Description du banc d'essai « pilote 2 »**

Cette partie expérimentale vient en complément du banc d'essai « pilote 1 » et cible à comprendre les phénomènes d'agglomération et de dispersion se produisant lors du filtrage des matières à particules submicroniques et dont les diamètres sont inférieurs à 1  $\mu\text{m}$ .

Cette étude a été réalisée dans le laboratoire « d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques » au niveau du centre de recherche CNRS Grenoble – France.

Le banc d'essai utilisé pour mener les expériences est schématisé sur la figure II.8.



**Figure II.8 :** Dispositif expérimental utilisé

a) Schéma descriptif du banc expérimental b) Photo réelle du dispositif expérimental

1. Ventilateur
2. Précipitateur avec filtre en papier
3. Vanne  $V_1$
4. Générateur de fumée
5. Vanne  $V_2$
6. Ballon de stockage de fumée
7. Précipitateur Electrostatique principal
8. Aspirateur à coquille

Il a été conçue par un groupe de chercheurs et se subdivise en trois sections distinctes jouant des fonctions différentes et qui comprennent :

- Un précipitateur électrostatique à plaques parallèles qui sert à filtrer les fines particules constituant les différents types de fumées et de poudres submicroniques utilisées.
- Une section qui sert pour réaliser le mélange air et particules puis son stockage.
- Une section pour la collecte et la mesure de la concentration des particules et donc le rendement fractionnaire.

L'installation commence par un ventilateur qui purge l'air ambiant vers un précipitateur mécanique dont le filtre est du papier de haute efficacité de filtration. L'air épuré qui en ressort sert à fluidifier les différentes fumées et poudres employées dans nos expériences afin de remplir un ballon de stockage de fluide. Les vannes utilisées sont des barrières physiques permettant le passage ou l'arrêt de l'aérosol dans les conduits vers l'aspirateur final.

Dans notre montage, nous avons utilisé deux vannes : vanne  $V_1$  qui est placée en amont du ballon de stockage et la vanne  $V_2$  qui est située en aval du générateur de fumée. Un dispositif de réglage de la vitesse d'aspiration est situé entre la sortie de l'électrofiltre et l'aspirateur et est exploité pour régler le débit de l'air dans l'installation. La vitesse d'écoulement est mesurée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud (Modèle TESTO 405-V1, 10  $\text{m.s}^{-1}$  et une résolution de 0,01  $\text{m.s}^{-1}$ ) et peut varier de 0  $\text{m.s}^{-1}$  à 2.5  $\text{m.s}^{-1}$ .

La terminaison de l'installation est une turbine d'aspiration à coquille qui est un système d'aspiration centralisée dans tout le bâtiment du laboratoire de recherche et dont l'évacuation se fait sur la terrasse. La figure II.8.b est une vue partielle du dispositif expérimental. Dans le § II.3.2 nous définirons en détail les équipements les plus importants utilisés dans ce montage.

### II.3.1. Description du précipitateur électrostatique

Cet électrofiltre est composé de deux plaques métalliques verticales parallèles d'une longueur de 1 m et une hauteur égale à 29 cm, distantes l'une de l'autre de 9 cm et qui sont reliées à la terre, elles sont soutenues en haut et en bas par deux planches en nylon.

Cette disposition comporte deux zones : Dans la première, deux planches horizontales en nylon sont trouées pour permettre la fixation en vertical d'un ou plusieurs fils métalliques fins de 1.5 mm de diamètre qui sont bien tendus et reliés à la haute tension dans le

but de produire une décharge couronne et de charger les particules de la matière polluante. Une petite fenêtre en plexi glace est réalisée en haut de cette zone et permet d'observer et faciliter les manipulations.

La deuxième zone est dépourvue de ces fils et sert juste pour la collecte des particules chargées. La figure II.9 illustre le schéma de principe d'un précipitateur électrostatique à plaques parallèles tandis que la figure II.10 est la photographie réelle de l'ESP utilisé.

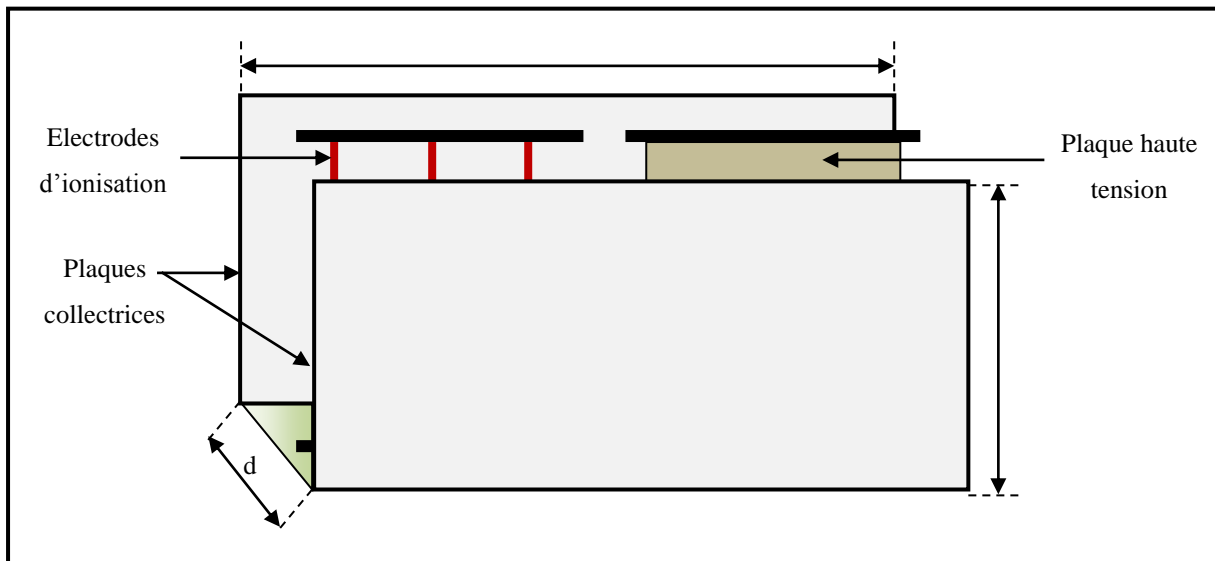


Figure II.9 : Schéma représentatif du filtre électrostatique



Figure II.10 : Photographie réelle du précipitateur électrostatique principal

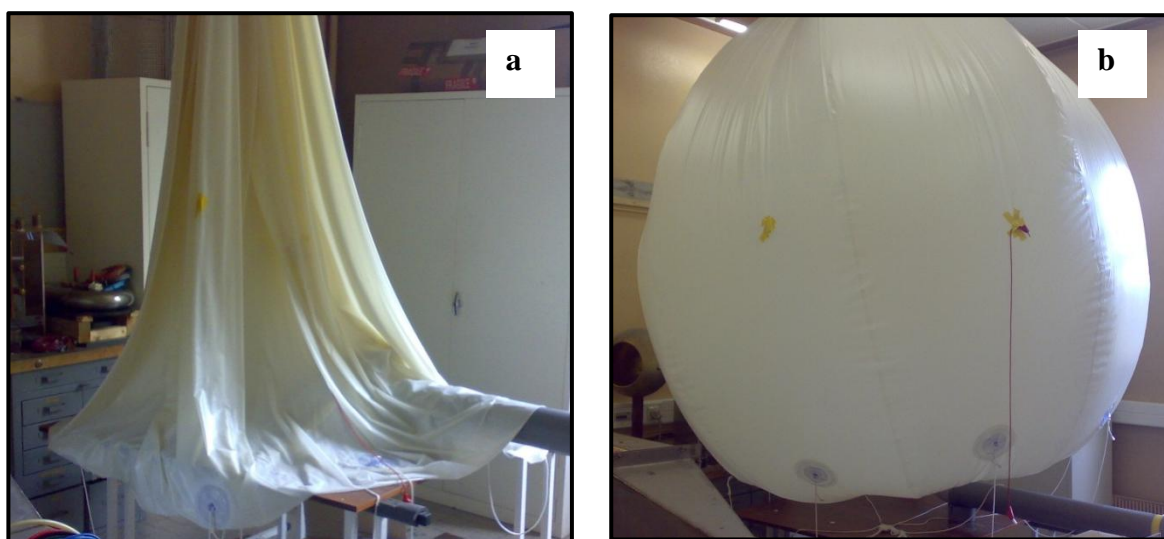
### II.3.2. Equipements utilisés

Ce sont l'ensemble des équipements qui une fois reliés au précipitateur électrostatique contribuent au fonctionnement du banc d'essai en assurant l'injection de la matière polluante, son stockage puis sa collecte, nous exposons dans la suite quelques descriptions élémentaires de ces équipements.

#### II.3.2.1. Ballon de stockage

C'est un ballon gonflable en plastique souple de 2.5 m de diamètre, d'une couleur claire afin de visualiser s'il y a dépôt de la poussière à l'intérieur du ballon (source d'erreurs dans les résultats). Il est fixé au plafond pour le maintenir stable à l'état gonflé.

De part et d'autre de l'une des faces du ballon, on attache un fil en plastique, qui une fois tendu, assure que le ballon soit rempli au même volume pour tous les essais expérimentaux (limite imposée comme une condition de tests). Dans la figure II.11 nous avons illustré le ballon à l'état initial (vide) et à l'état gonflé.



**Figure II.11** : Photographie du ballon de stockage de l'aérosol

(a) Ballon à l'état initial vide

(b) Ballon à l'état gonflé

#### II.3.2.2. Générateur de fumée (ou fluide)

C'est un compartiment très étanche fait en plexiglas transparent et comportant une ouverture rabattable facilitant l'introduction de la matière à injecter, il est situé entre deux conduits, l'un venant du ballon et l'autre menant vers le canal de stabilisation de l'aérosol.

Pour les essais utilisant la fumée (cigarettes, encens), une plaque métallique portant des pointes est introduite à l'intérieur de cet habitacle et sert de support pour fixer les cigarettes ou bâtons d'encens. Cette plaque peut supporter jusqu'à 64 cigarettes.

Pour les essais utilisant les poudres fluidifiées (calcite, cendres), le générateur de fluide est relié à un appareil injecteur de particules. La figure II.12 illustre le générateur de fumée en question.



**Figure II.12** : Photographie du générateur de fumée et support de fixation des cigarettes et encens.

### II.3.2.3. Appareil d'injection de la poudre (cendres, calcite)

Afin de permettre l'injection de la poudre, nous avons utilisé un appareil appelé « Dry Powder Feeder » et dont le modèle est « MALVERN Instrument » illustré sur la figure II.13



**Figure II.13** : Photographie de l'appareil d'injection de la poudre

#### II.3.2.4. Conduite de tranquillisation des particules

C'est un canal réalisé en poly méthacrylate de méthyle (PMMA) situé en amont de l'entrée du précipitateur, d'une section transversale rectangulaire de 9 cm x 29 cm et de longueur de 3 m. Il sert à stabiliser le mouvement des particules avant d'atteindre le précipitateur. Cette longueur est suffisante pour obtenir une concentration uniforme des particules. La figure II.14 montre l'aspect extérieur de cette conduite.



Figure II.14 : Photographie de la conduite de tranquillisation des particules

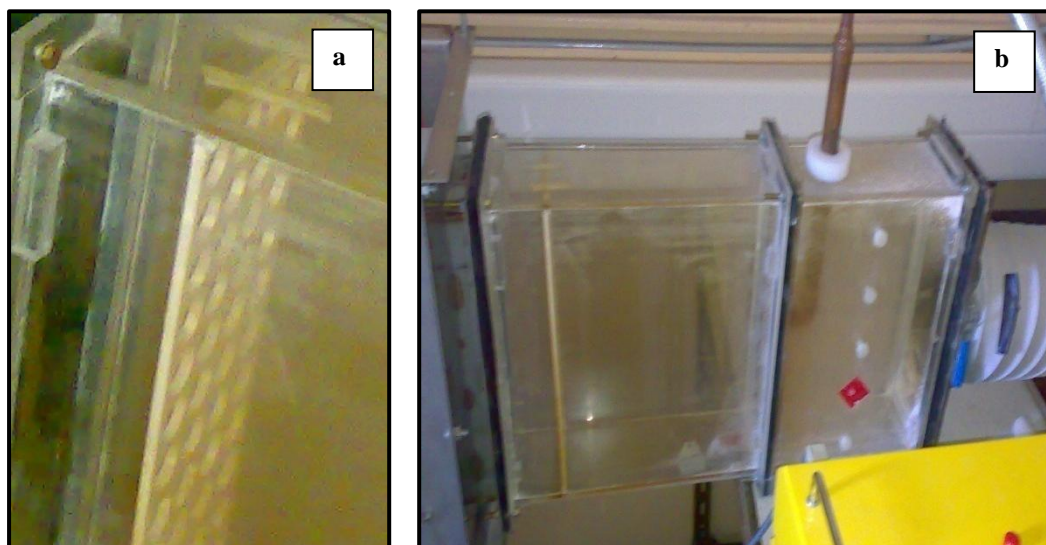
#### II.3.2.5. Chambre de collecte et Nid d'abeille

C'est une enceinte en plexiglas transparent située à la sortie du précipitateur électrostatique et reliée à l'aspirateur à l'aide d'un raccord en PVC.

Cette chambre est divisée en deux compartiments :

Le premier est muni à son entrée d'une cellule en nid d'abeille qui sert à stabiliser et à homogénéiser le flux d'air sortant du précipitateur. La figure II.15.a met en évidence l'apparence de cette cellule.

Le second représente la zone de collecte des particules grâce à une sonde reliée au granulomètre laser. La figure II.15.b révèle l'aspect de cette chambre.



**Figure II.15** : Photographie représentant la chambre de collecte

a) Plaque en nid d'abeille

b) Chambre de collecte et vue de la sonde du granulomètre laser

### II.3.2.6. Granulomètre Laser pour Aérosol

Le granulomètre laser est un compteur de particules basé sur la diffraction de la lumière aux petits angles pour une mesure à haute concentration entre 0,3 et 20  $\mu\text{m}$ .

Méthode de mesure unique des dimensions des particules indépendante de toute hypothèse sur la courbe de distribution granulométrique. Cette méthode combine haute sensibilité, justesse et rapidité de la mesure. Il est en effet intéressant d'utiliser la corrélation entre caractéristiques physiques et optiques dont la mesure est fiable et pratique. Les instruments de la série LAP sont basés sur une mesure de particules une à une. Ils donnent une granulométrie précise et une mesure de concentration dans les aérosols très concentrés avec une excellente résolution granulométrique.

Avantages Particuliers:

- Granulométrie rapide sans contact des distributions
- Large gamme de concentration jusque  $10^5$  particules/ $\text{cm}^3$
- Influence minimale de la nature du produit par utilisation de la diffraction laser directe
- Haute sensibilité par utilisation de laser He-Ne
- Volume de mesure optimisé
- Pas d'hypothèse à priori sur la distribution granulométrique



- Facile à utiliser avec son logiciel convivial sous Windows
- Conception robuste, petit et léger et portable

Applications:

- Mesure de la granulométrie (sprays, poussières, poudres)
- Mesure de référence pour la calibration et le test des Aérosols
- Caractérisation et tests des filtres
- Estimation de l'efficacité séparatrice

Principe de fonctionnement

La plage de taille des particules analysables par cet appareil est comprise entre 0,312  $\mu\text{m}$  et 20  $\mu\text{m}$  sur 92 canaux. La concentration maximale mesurable est de  $10^5$  particules par  $\text{cm}^3$ . Le principe de mesure de l'efficacité consiste à effectuer des prélèvements gazeux à l'entrée et à la sortie du filtre électrostatique et à mesurer la concentration en particules. Les prélèvements gazeux sont effectués à partir de cannes isocinétiques placées à l'intérieur de la conduite. Le compteur laser est doté de deux circuits : un circuit principal à l'intérieur duquel le mélange air-particules est aspiré avec un débit constant au cours du temps (des capteurs de pression pilotent la pompe d'aspiration) et un circuit de mesure dans lequel seulement une petite partie de la suspension aspirée est prélevée. Les particules sont alors dirigées par l'intermédiaire d'un tube très fin vers la cellule optique de l'appareil. Chaque particule qui passe va diffuser une certaine quantité de la lumière fournie par un laser He-Ne bien focalisé; l'intensité de la lumière diffusée, qui dépend de la taille des particules, est mesurée par un ensemble de photodiodes.

Pour cette raison, à la fois l'aérosol et le rayon laser sont focalisés dans un plan et s'interceptent dans un plan qui correspond au plan propre au système de détection limité par une fente d'entrée.

Les avantages particuliers à utiliser un tel dispositif pour délimiter la zone mesurée permettent une isolation optique parfaite de la zone et une intensité lumineuse maximale sur la région choisie d'un aérosol concentré.

Seules des concentrations supérieures à  $10^5$  particules / $\text{cm}^3$  induisent une perte d'efficacité par coïncidence.

L'instrument fonctionne avec le logiciel « PASWin ». Il est calibré avec des particules certifiées par microscopie à balayage et il est livré avec son certificat de calibration.

La figure II-18 ci-dessous illustre la photo du granulomètre laser utilisé [22] [40].



Figure II.16 : Granulomètre laser modèle LAP 320 – marque TOPAS

### II.3.3 Echantillon de particules

Afin de prouver et surtout de généraliser les phénomènes qu'on veut établir, on a choisi de travailler avec différentes matières à très fines particules à savoir [22] [41]:

#### II.3.3.1. Fumées de cigarettes

La fumée de cigarette est un aérosol, mélange de gaz et de particules qui contient plus de quatre mille (4000) substances dont plus de quarante (40) sont dangereuses pour la santé non seulement de l'individu mais aussi pour leurs incidences sur l'environnement.

Une fois allumée, la cigarette est une véritable usine chimique, sa combustion provoque la formation de nombreuses substances toxiques telles que :

- Les goudrons qui sont la principale cause des cancers, le fumeur d'un paquet par jour inhale 250 ml de goudrons par an.
- Les gaz toxiques tels que : le monoxyde de carbone, le monoxyde d'azote, l'acide cyanhydrique et l'ammoniac.
- Les métaux lourds comme le cadmium, le mercure, le plomb et le chrome.

Dans notre projet, nous avons utilisé deux marques de cigarettes qui sont les « Marlboro » et les « Gauloises ».

#### II.3.3.2. Calcite

Afin de pouvoir observer un dépôt de poussière relativement important, il est nécessaire d'utiliser une poudre dont la résistivité est comprise dans une gamme où l'efficacité du précipitateur est suffisante. Pour préparer la suspension air-particules, nous

avons utilisé une fine poudre de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) utilisée dans l'industrie papetière pour blanchir le papier. Cette poudre convient parfaitement à notre étude car sa distribution (en nombre) est centrée sur  $0,5 \mu\text{m}$  et d'autre part sa résistivité électrique varie entre  $10^8$  et  $10^{12} \Omega\cdot\text{cm}$ . La masse volumique de la calcite est de  $2.71 \text{ g/cm}^3$  [22] [37].

### II.3.3.3. Encens

L'encens correspond aux résines d'arbres de la famille *Boswellia* qui ne poussent que dans quelques régions du soudan, d'Ethiopie du Yémen et de la Somalie.

Brûler de l'encens (figure II.17) produit des concentrations élevées en benzène, toluène, éthylbenzène, styrène, formaldéhyde, acétaldéhyde et acroléine, ainsi que des hydrocarbures alipathiques polycycliques (HAP) et des particules qui pénètrent profondément dans le système cardio-vasculaire et respiratoire. Alors que l'encens est une source de pollution de l'air intérieur, les utilisateurs pensent majoritairement que ces produits ont un impact positif et pas néfaste pour l'environnement.

Un usage modéré de l'encens est recommandé en raison des polluants émis lors de leur combustion dans une pièce fermée.

A partir de plusieurs scénarios d'usage de neuf encens l'étude a démontré que certains usages de ces produits parfumant peuvent conduire à des dépassements de valeurs sanitaires pour certains polluants (benzène, formaldéhyde, etc.) préjudiciables aux personnes présentes (risque d'irritation des voies respiratoires), L'étude souligne même que, pour des utilisateurs intensifs, des effets sanitaires à long terme (augmentation du risque de certains cancers) sont possibles. Pour cette raison, on conseille d'éviter l'inhalation directe de fumée et d'aérer la pièce après utilisation pendant au moins dix minutes par une ouverture sur l'extérieur.



**Figure II.17 :** Fumée dégagée lors de la combustion de l'encens

### II.3.3.4. Cendres

Les appellations des stocks de cendres sont multiples, incertaines, et présagent d'une anarchie réglementaire et administrative. Nous les appellerons donc des dépôts. Les cendres issues de la filtration des gaz de combustion de combustibles d'origine fossile doivent faire l'objet d'une procédure d'autorisation si le stockage a vocation à être temporaire ou à être permanent.

La variabilité des teneurs en métaux et la mobilité des sulfates devraient inciter à plus de vigilance dans le classement de ces matériaux, sans parler des composés organiques. A titre d'exemple, il y aurait 100 g de dioxines dans 100000 tonnes de cendres. C'est pourquoi il nous paraît dangereux de considérer d'une manière définitive et générique les cendres comme des déchets inertes.

Les cendres volantes sont les résidus de la combustion de matériaux fossiles, le lignite et la houille. Elles sont un résidu de procédé thermique inscrit dans la liste des déchets mondiale.

En France les dépôts de cendres volantes sont assimilés à des dépendances des centrales thermiques d'Electricité de France, de la Société Nationale d'Electricité et de Thermique (SNET) et des autres producteurs qui ont pour obligations de réaliser et de diffuser des études d'impacts et incidences sur l'environnement.

Il faut noter que les cendres utilisées dans nos expériences proviennent d'une centrale thermique située en Provence (France) et ont été extraites à partir du troisième champ d'un précipitateur industriel [42] [43] [44].

### II.3.4 Procédure expérimentale

Elle décrit la procédure utilisée pour mener nos expériences avec les différentes matières polluantes (définies au préalable dans le § II.3.3).

#### II.3.4.1. Fumée de cigarettes

##### Phase 1 : Préparation des expériences

La préparation des expériences est obligatoire et comprend les étapes suivantes :

**1.1** Purifier le poste de travail en entier de toutes les impuretés et résidus pouvant fausser les résultats, ces opérations de nettoyage comprennent :

Le précipitateur électrostatique : on commence par démonter les modules annexes au précipitateur, on procède ensuite à un battage puis soufflage minutieux de ces plaques et

enfin on passe un chiffon imbibé d'alcool sur les différentes surfaces pour les stériliser et être sûres d'éradiquer toutes sortes d'impuretés. On finit par le remontage de toutes les parties du précipitateur électrostatique.

Le ballon de stockage : pour son nettoyage, on remplit complètement le ballon avec de l'air pur en allumant le ventilateur et ouvrant la vanne 1 puis on procède à sa vidange en fermant la vanne 1 et ouvrant la vanne 2. Cette opération est répétée plusieurs fois jusqu'à ce que l'air stocké dans le ballon soit pur et limpide. On finit par vider le ballon nettoyé pour commencer les tests.

Un dépoussiérage rigoureux est exécuté au niveau de la chambre de collecte des particules, la conduite de stabilisation ainsi que le filtre en papier.

**1.2** Relier tous les équipements annexes au précipitateur électrostatique et garder les Vannes 1 et vanne 2 à l'état fermé.

**1.3** Relever les mesures de la température et humidité ambiantes.

**1.4** Préparer les appareils de mesure nécessaires pour les essais, notamment le granulomètre, en l'allumant et en effectuant les réglages préliminaires à savoir le nombre et la durée des cycles de mesures.

**1.5** Démarrer le logiciel de traitement des données « PASwin » et procéder aux réglages de chaque expérience en raccord avec les paramètres prédéfinis sur le granulomètre.

## **Phase 2: Préparation de l'échantillon de particules**

La préparation de l'échantillon de particules nécessite les opérations suivantes :

**2.1** Prendre un échantillon de cigarettes (marque et nombre définis) et les poser verticalement sur un support portant des clous de fixation.

Pour les cigarettes de la marque « A » on enlève le filtre pour permettre leur combustion par contre celles de la marque « B » ne nécessitent pas ce type d'opération.

## **Phase 3: Déroulement des tests expérimentaux**

Le déroulement des tests expérimentaux est comme suit :

**3.1** Allumer simultanément toutes les cigarettes et mettre le support dans le générateur de fumées. Fermer la portière et laisser les cigarettes se consumer.

**3.2** Mettre en marche le ventilateur qui va servir à pousser l'air ambiant vers le filtre en papier. Ouvrir la vanne 1, l'air purifié va se diriger vers le générateur de fumée et propulser la fumée de cigarette vers le ballon.

**3.3** Laisser le ballon se remplir à la limite imposée dans les paramètres de test en vérifiant que le câble fixé sur ce dernier soit bien tendu. A ce moment fermer la vanne 1 et éteindre le ventilateur.

**3.4** Allumer simultanément le générateur de haute tension et la turbine aspirante et ouvrir la vanne 2. La fumée va s'écouler grâce à l'action de l'aspiration vers la conduite de tranquillisation et arriver à l'entrée du précipitateur électrostatique.

**3.5** Les particules arrivant à la première zone du précipitateur électrostatique vont être chargées par bombardement d'effet couronne puis se dirigent vers la deuxième zone de collecte.

#### **Phase 4 : Protocole de mesure**

Le protocole de mesure passe par les étapes suivantes

**4.1** Les particules arrivant vers la chambre de collecte vont traverser en premier lieu la plaque en nid d'abeille qui va les disperser et homogénéiser leurs répartitions dans l'air. Cette précaution est nécessaire pour éviter leur entassement sur la sonde provoquant la détérioration du fonctionnement du granulomètre.

**4.2** Les prélèvements gazeux sont effectués à partir de cannes placées à l'intérieur de la chambre de collecte. Le granulomètre laser est doté de deux circuits : un circuit principal à l'intérieur duquel le mélange air-particules est aspiré avec un débit constant au cours du temps (des capteurs de précision pilotent la pompe d'aspiration) et un circuit de mesure dans lequel seulement une petite partie de la suspension est prélevée. Les particules sont alors dirigées par l'intermédiaire d'un tube très fin vers la cellule optique de l'appareil. Chaque particule qui passe va diffuser une certaine quantité de la lumière fournie par un laser **He-Ne** bien focalisé ; l'intensité de la lumière diffusée qui dépend de la taille des particules, est mesurée par un ensemble de photodiodes [22] [35].

**4.3** Les données captées par le compteur optique sont alors transmises vers le logiciel « PASwin » qui va les assembler en sortie sous formes de fichiers exploitables via des applications de tableurs. Cette partie de l'expérience est exposée dans le troisième chapitre concernant l'analyse des résultats obtenus.

### **Phase 5 : Compléments des tests et essais**

L'ensemble des essais décrits précédemment au § II.3.4 est répété plusieurs fois en faisant varier la concentration des particules selon le plan expérimental préliminaire prédéfini.

#### **II.3.4.2. Fumée d'encens**

La démarche menée pour filtrer la fumée d'encens est pareille à celle utilisée pour les cigarettes du fait de la similitude des particules contenues dans les deux fumées, à la seule différence pour la phase de préparation de la matière à injecter.

En effet, il convient de prendre un nombre de bâtons d'encens (selon les paramètres prédéfinis de tests), de les fixer sur le support métallique puis les allumer vivement pour harmoniser leurs combustions.

La suite du processus est similaire à celle décrite dans le § II.3.4 phases 1-3-4-5.

#### **II.3.4.2. Calcite**

##### **Phase 1: Préparation des expériences**

La préparation des expériences comprend le nettoyage des différents éléments servant à l'injection, le stockage, le filtrage et la collecte des particules ainsi que le câblage des équipements utilisés. Pour plus de détails se reporter au § II.3.4 – Phase 1 concernant les essais sur les cigarettes.

##### **Phase 2 : Préparation de l'échantillon de particules**

La préparation de l'échantillon de particules nécessite les opérations suivantes :

**2.1** La réserve de poudre de calcite que nous avons employée existe dans le laboratoire depuis plusieurs années, de ce fait elle a absorbé de l'eau et les forces capillaires provoquent un certain degré d'agglomération des particules.

Pour avoir une bonne dispersion et des résultats reproductibles, il est nécessaire de la déshydrater dans une étuve à 110°C, ainsi la matière est prête pour les essais.

##### **Phase 3 : Déroulement des tests expérimentaux**

Le déroulement des tests expérimentaux est comme suit :

**3.1** On prend une dose de poudre de calcite (avec une cuillère réservée à cet effet pendant toutes les manipulations) et on la dépose sur une trémie vibrante, cette trémie amène la poudre avec un débit constant. Les agrégats de poudre sont cassés par le jet d'air (nous

utilisons de l'air comprimé sous une pression de bars contrôlée à l'aide d'un détendeur) et sont poussés vers le générateur de fluide.

Remarques importantes :

- Dans le cas des poudres, celles-ci doivent être diluées pour faire varier la concentration des particules (paramètre de réglage), dans le premier test, on commence par une

dose de calcite non diluée.

- Dans cette partie, on va exposer un essai avec dilution de la poudre, voici donc le processus de dilution détaillé dans les § 3.1.1 - §3.1.2 et § 3.1.3 :

**3.1.1** Mettre en marche le ventilateur, l'air ambiant va être purifié à travers le filtre en papier et amener la poudre vers le ballon, laisser ce dernier se remplir à sa limite.

**3.1.2** Fermer la vanne 1 puis ouvrir la vanne 2, l'air contenu dans le ballon va s'échapper progressivement. Fermer la vanne 2 lorsqu'il atteint la moitié de son volume.

**3.1.3** Allumer à nouveau le ventilateur et rouvrir la vanne 1 et laisser le ballon se remplir à nouveau jusqu'à sa limite. Eteindre le ventilateur et fermer la vanne 1.

Par cette suite d'opérations on vient de diluer l'aérosol stocké dans le ballon.

**3.2** Allumer simultanément le générateur de haute tension et la turbine d'aspiration et ouvrir la vanne 2. La poudre fluidisée va s'écouler grâce à l'action de l'aspiration vers la conduite de tranquillisation et arriver à l'entrée du précipitateur électrostatique

**3.3** Les particules arrivant à la première zone du précipitateur électrostatique vont être chargées sous l'effet couronne puis se dirigent vers la deuxième zone de collecte.

Ces particules vont suivre le même parcours, pour être analysées ensuite avec le granulomètre laser.

#### **Phase 4 : Compléments des tests et essais**

L'ensemble des essais décrits précédemment au § II.3.4 partie (c) est répété plusieurs fois en faisant varier la concentration des particules (par processus de dilution décrits précédemment) selon le plan expérimental préliminaire prédéfini.

##### **II.3.4.3. Cendre**

La poudre de cendre étant similaire à celle de la calcite, la méthode utilisée pour la filtrer, exige le passage par les différentes phases séquentielles détaillées dans le § II.3.4 partie (c) phases 1-2-3-4-5.



### II.3.5. Logiciel de traitement des données « PASWIN »

C'est un logiciel de granulométrie en temps réel qui permet la mesure, l'affichage, l'enregistrement et la manipulation des données, il présente les caractéristiques suivantes:

- C'est un logiciel multitâche
- Il fonctionne sous Windows avec menus déroulants et boîtes de dialogue.
- Il est sollicité dans les statistiques
- Il s'adapte comme support vers d'autres applications Windows
- C'est un outil de comparaison de résultats
- Il permet le choix de gamme, de résolution et d'axe linéaire ou logarithmique
- Il fait le calcul des distributions en volume, nombre et surface sous forme de graphes ou tableaux.

La figure II.18 montre l'interface principale de ce logiciel [40]

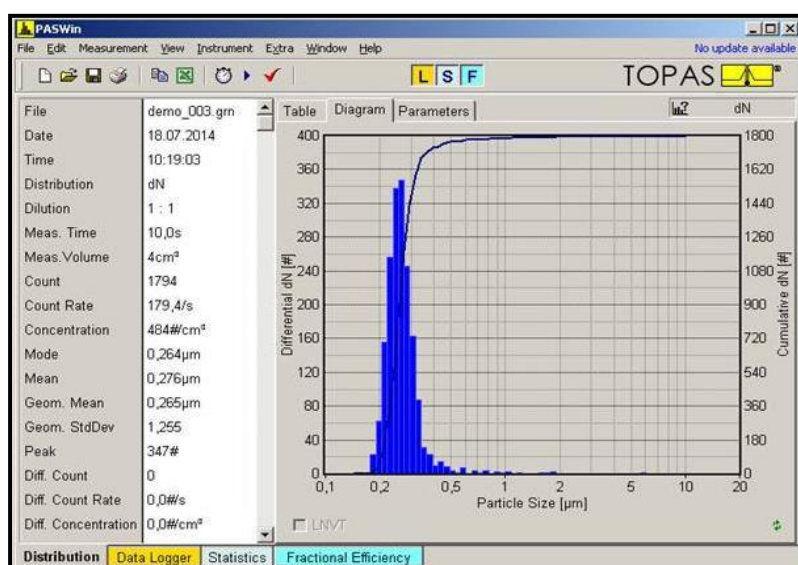


Figure II.18 : Interface de travail du logiciel « PASWin »

### II.3.7 Logiciel de modélisation et simulation numérique

De nos jours la simulation numérique est devenue un outil essentiel dans le domaine de la recherche et de l'ingénierie, elle permet la compréhension et la modélisation du fonctionnement des systèmes physiques réels.

Pour commencer nous allons expliquer de façon succincte la démarche scientifique utilisée en modélisation et analyse numérique en passant par les étapes suivantes ;

Modéliser le phénomène réel :

Modéliser un phénomène c'est créer un modèle mathématique de la réalité.

Etablir les lois de comportement sous forme d'équations mathématiques qui décrivent l'évolution du système.

Préciser les hypothèses pour lesquelles le modèle sera proche de la réalité, il peut y avoir plusieurs variantes du modèle.

Discretisation :

Le plus souvent les équations décrivant ce phénomène n'ont pas de solution analytique, c'est pourquoi il est nécessaire de les transformer en un problème proche adapté au calcul numérique par ordinateur en discrétisant le domaine, les fonctions et les équations.

Résoudre le problème approché consiste à calculer un nombre fini de valeurs solution d'un nombre fini d'équations.

Des questions se posent relatives à l'existence, l'unicité et les propriétés de la solution proche en plus de sa convergence vers la solution du problème continu.

Algorithme de résolution :

Construire un algorithme revient à préciser le processus qui permet d'obtenir la solution approchée à partir des données.

Souvent plusieurs processus sont possibles, il faut opter pour l'efficacité en terme de rapidité, espace de stockage, stabilité et précision (effet des erreurs d'arrondis)

Pour calculer effectivement la solution il faut choisir un environnement informatique, un ordinateur, un système d'exploitation, un langage de programmation et un compilateur.

Visualisation et exploitation des résultats :

Une fois que le logiciel construit produit une solution acceptable, il reste à exploiter la suite des valeurs numériques obtenues pour déduire une information nouvelle sur le phénomène étudié.

Il est alors nécessaire de représenter les résultats sous forme de graphiques ou d'animations et les comparer avec des mesures réelles pour valider ou ajuster le modèle

Notre choix s'est porté sur le logiciel **Comsol multiphysics** qui est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire qui permet d'avoir un environnement de simulation incluant la potentialité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié, en plus de sa fonction de modéliser une grande variété de phénomènes physiques réels. C'est aussi un outil de conception grâce à son aptitude à gérer les géométries 3D complexes.

Comsol multiphysics contient différentes modules physiques parmi lesquelles on cite [17] [45] [46]:

- La mécanique des fluides.
- Le transfert thermique.
- L'électricité.
- L'électromagnétisme.
- La chimie.
- La mécanique des structures.
- Les équations mathématiques.
- Plasma.
- Optimisation.
- Trajectoire des particules.

On trouve également un ensemble de modèles pour les EDF classiques : équation de Laplace, équation de poisson, équation d'onde, équation de Helmholtz, équation de la chaleur et équation de type convection-diffusion.

Ce logiciel contient des outils de maillages automatiques et semi-automatiques dont le maillage tétraédrique libre et le maillage extrudé. L'algorithme par défaut génère automatiquement un maillage tétraédrique pour les solides et une combinaison du maillage tétraédrique et maillage extrudé pour les fluides.

On peut également définir une séquence de maillage qui permet d'utiliser conjointement des éléments tétraédrique, prismatiques ou hexaédriques et elle peut être pilotée par paramètres. De plus on trouve même des maillages qui correspondent à des phénomènes physiques (plasma, CFD) bien définies.

Comsol multiphysics fait appel à des méthodes d'analyse numérique à la pointe de la technologie pour créer et résoudre les modèles. Les modules complémentaires utilisent différentes méthodes comme :

La méthode des éléments finis qui autorise des couplages multiphysiques illimités constituant le point fort de ce logiciel en comparaison aux autres logiciels de simulation existant.

La méthode du volume fini.

A méthode des éléments de frontière

Méthodes de suivi des particules.

Le processus de modélisation et de simulation numérique sous Comsol multiphysics comprend les étapes suivantes :

- La définition globale des paramètres et des variables liées au modèle.
- La définition de sa géométrie soit en 1D, 2D ou 3D.
- La prise en compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré.
- Implantation des conditions aux limites relatives à la physique utilisée.
- Maillage.
- La résolution du problème à l'aide de l'un des différents solveurs.
- La visualisation des résultats.

Pour terminer cette présentation que nous jugeons nécessaire à la compréhension des résultats de notre étude, la figure II.19 montre l'interface de travail du logiciel Comsol multiphysics [47].

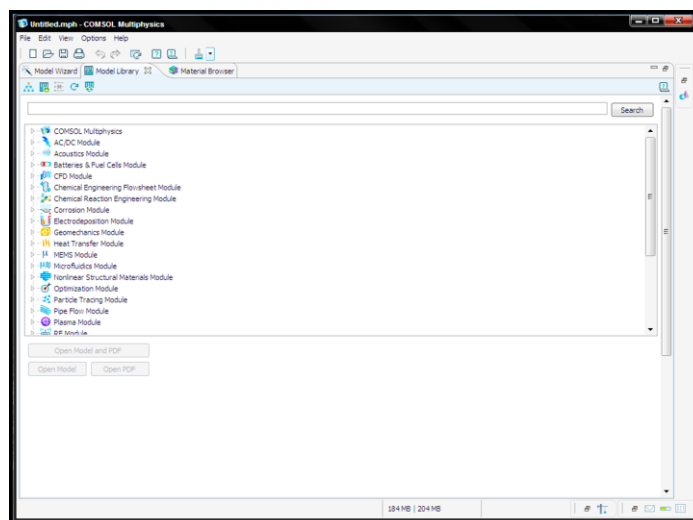


Figure II.19 : Interface de travail du logiciel « Comsol multiphysics » [45].

## II.4. Conclusion

On a essayé à travers ce chapitre d'exposer la procédure expérimentale de ce travail ainsi que le matériel utilisé. On a divisé notre procédure expérimentale en deux grandes parties.

Dans la première partie, on a présenté le précipitateur qu'on a réalisé au sein du laboratoire APELEC à Sidi-Bel-Abbès, qu'on a nommé «pilote 1». Ce pilote présente l'avantage de pouvoir analyser le mécanisme de charge des particules dans n'importe quelle section de la longueur de ce précipitateur. On a ensuite décrit les différents appareils annexes qui servent à la mise en œuvre de l'épuration des particules à leur collecte.

La deuxième grande partie est consacrée au travail expérimental effectué au laboratoire CNRS de Grenoble, qui concerne plus particulièrement l'épuration des particules de tailles submicroniques. On a détaillé aussi dans cette partie le précipitateur principal utilisé qu'on a nommé «pilote 2», ainsi que l'ensemble des appareils annexes de mesure et de mise en place de l'épuration électrostatique. On a donné un intérêt particulier aux particules microniques et submicroniques utilisées lors des différentes expériences comme échantillon granulaire de matière polluante.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude expérimentale réalisée sur le « pilote 2 » suivie d'une modélisation qui intègre les différents phénomènes régissant la précipitation électrostatique, et surtout l'analyse de la trajectoire des particules en fonction de la granulométrie.

## **Chapitre III**

---

### **Agglomération-Dispersion pour les Particules Submicroniques**

**Chapitre III**  
**Agglomération- dispersion pour les particules**  
**submicroniques**

**III.1. Introduction**

Dans le domaine de l'épuration électrostatique de l'air, le rendement des précipitateurs électrostatiques des particules, pour des diamètres supérieurs à 1  $\mu\text{m}$ , ne pose aucun souci car il atteint généralement des rendements jusqu'à 99,9 %. Le problème majeur subsiste dans les particules submicroniques de diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$  et plus précisément dans la gamme entre 0,3  $\mu\text{m}$  et 0,7  $\mu\text{m}$ . Pour cette raison, à travers le travail proposé dans ce chapitre, on tente de mettre un peu de lumière sur les phénomènes rencontrés dans ce genre d'installations de précipitateurs électrostatiques [41] [42].

La procédure expérimentale proposée dans ce chapitre consiste à évaluer la distribution en taille de particules submicroniques contenues dans différentes fumées (Cigarettes, encens) et aussi différentes poudres (calcite, cendres). Nous prélevons par l'intermédiaire de cannes isocinétiques un volume de gaz circulant dans notre précipitateur pilote, en entrée et en sortie. Ces prélèvements sont analysés grâce à un granulomètre laser. On obtient alors la distribution en taille granulométriques et le rendement fractionnaire pour chaque classe de taille.

On commence par étudier l'agrégation qui est le phénomène de base. Deux phénomènes essentiels participent à l'agrégation :

- La collision des particules, laquelle est guidée par l'hydrodynamique du milieu suspendant (fluidisant) ;
- L'interaction physique entre particules : des forces attractives ou répulsives favoriseront ou non la collision et le collage.

On entame ensuite, le deuxième phénomène qui est la dispersion ou la désintégration.

Une modélisation de la trajectoire des particules qui prend en considération tous les phénomènes liés à la précipitation électrostatique est ensuite faite afin de prouver l'exactitude de l'hypothèse (agglomération-dispersion).

## III.2. Génération de la turbulence par les particules submicroniques

### III.2.1. Caractéristique courant-tension

Afin de voir l'influence de la charge due aux particules sur le courant, on trace la caractéristique du courant à vide  $I_0$  (sans particules) en fonction de la tension appliquée et aussi la caractéristique du courant  $I$  (avec particules) en fonction de la tension.

En appliquant la tension sur le fil ionisant, on injecte des ions et on charge les particules traversant la zone de charge d'espace ionique. La charge d'espace totale (ions + particules chargées) provoque un écoulement secondaire du gaz qui déforme significativement l'écoulement primaire laminaire original. Le mouvement des particules résulte de l'écoulement du gaz et de la vitesse  $w_E$  des particules par rapport à l'air [22] [41].

Le courant de décharge moyen dépend de la concentration des particules (Figure III.1 et Figure III.2). Comme les particules ont une vitesse de migration environ 1000 fois plus petite que celle des ions, seuls les ions contribuent au courant. Le rapport  $I/I_0$  donne la proportion de charge d'espace due aux ions [48].

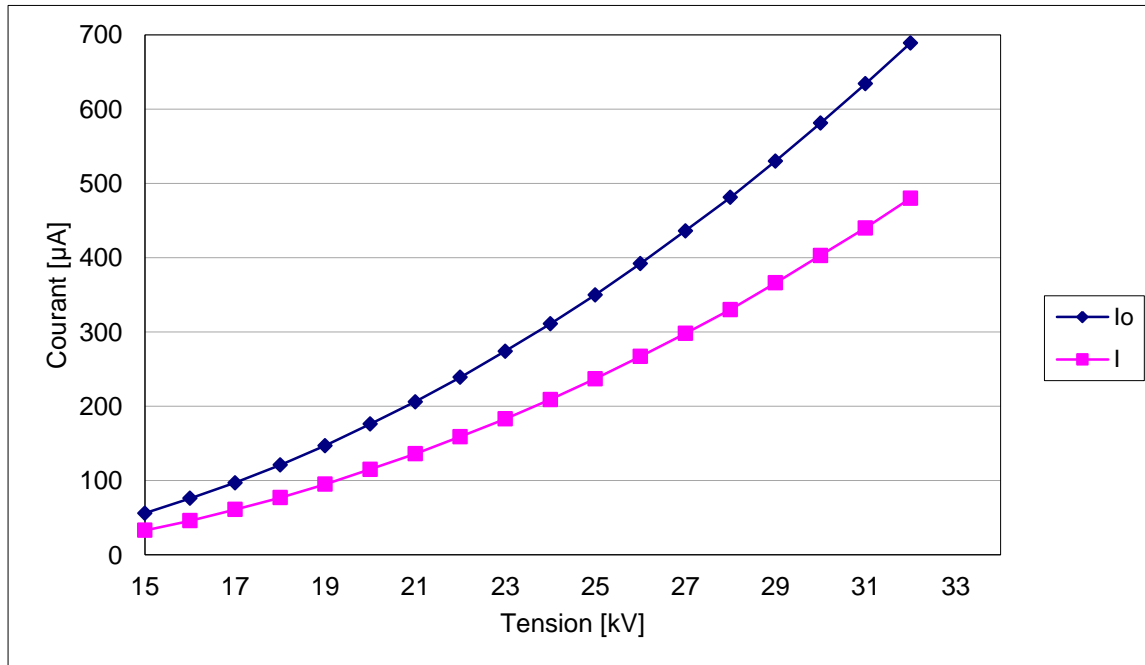


Figure III.1 : Caractéristique courant-tension avec et sans particules



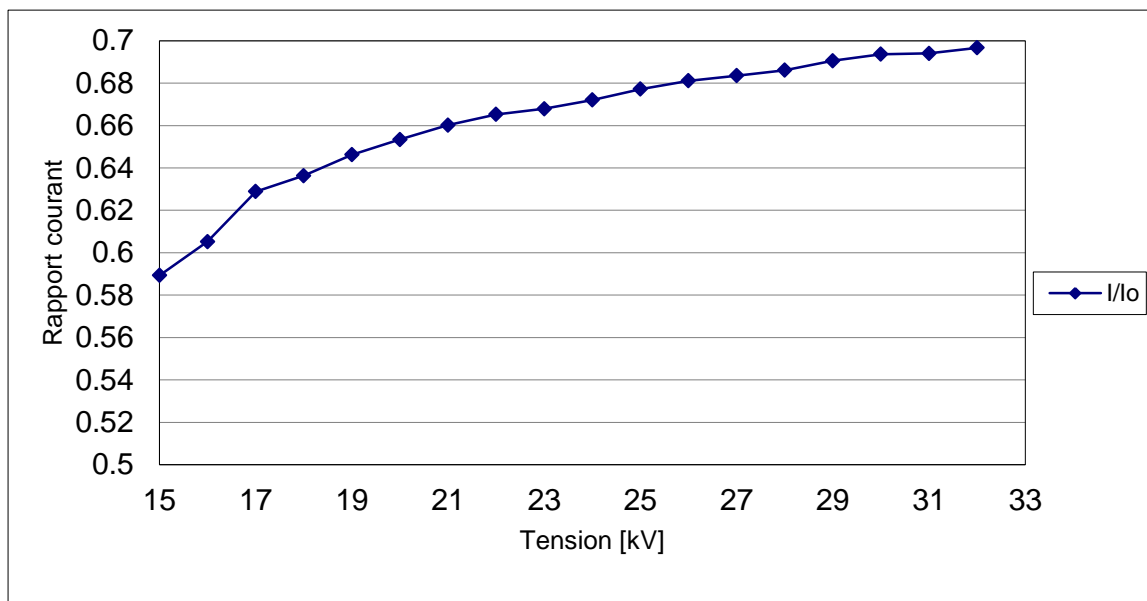


Figure III.2 : Rapport des courants avec et sans particules.

### III.3. Phénomène d'agglomération

#### III.3.1. Constitution d'agrégats

L'agglomération (au sens large) d'une suspension est la collision, agrégation suivie d'un collage entre particules solides dans le fluide suspendant. Une agglomération est le fruit d'une collision binaire efficace entre particules, suivie ou non d'une dissociation par le champ des vitesses ou les chocs divers [49] [50].

Ces processus sont bien évidemment répétitifs et peuvent conduire à des agglomérats de forte taille par rapport aux particules initiales. L'agrégation (ou coagulation) est le phénomène de base : l'objet issu de la collision de particules primaires (germes ayant grossi) et un assemblage de ces dernières, qui gardent donc leur individualité. L'agrégat est par conséquent fragile. A l'inverse, on parlera de désagrégation pour la rupture d'un agrégat. L'agglomération est une agrégation associée à de la croissance cristalline (la sursaturation est faible, mais non nulle) : la liaison entre particules primaires est consolidée par la formation d'un col cristallin. L'agglomérat est en général cohésif. Il se détruit donc par une brisure [51].

#### III.3.2. Variation de la concentration particulaire de fumée

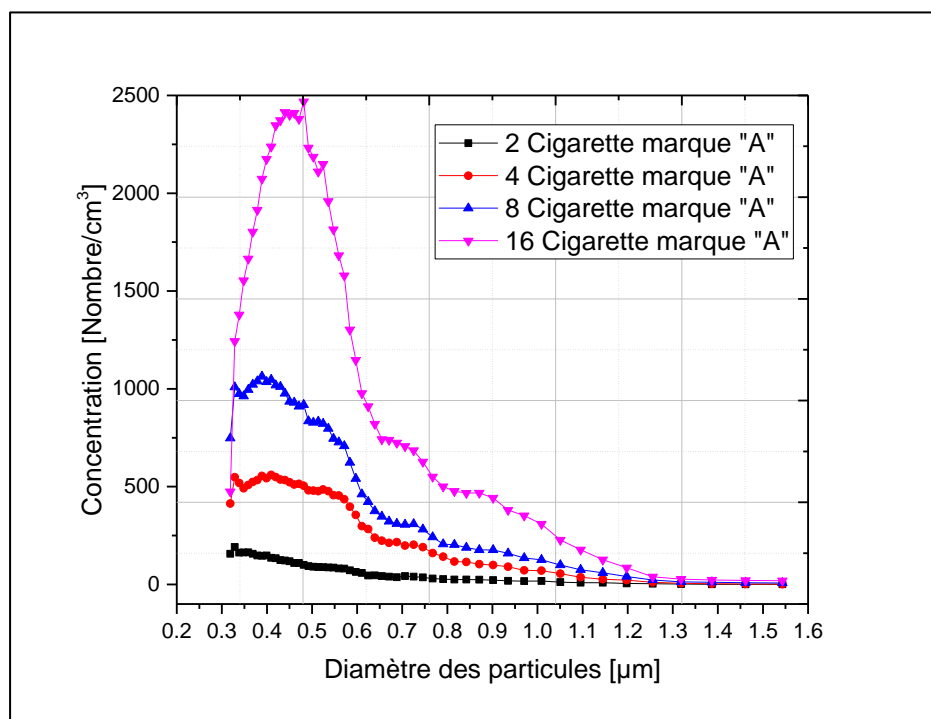
Les trois courbes des figures III.3-III.5 représentent la distribution granulométrique pour trois genres de fumée, des cigarettes de marque A, des cigarettes marque B ainsi que des bâtons d'encens, en fonction de la concentration particulaire pour différentes classes

granulométriques. Ces courbes servent comme référence pour le calcul de l'efficacité fractionnaire.

On voit clairement que la concentration en entrée pour les cigarettes de marque A est plus importante par rapport aux cigarettes marque B. Comme, on peut remarquer dans les deux cas, que la taille particulaire de la fumée augmente en augmentant la concentration.

On voit bien qu'en augmentant la concentration des différentes fumées, la probabilité pour qu'une particule entre en collision avec d'autres particules est plus grande et donc il y a formation d'agglomérats de plus grande taille. En se référant à la figure III-4, on remarque clairement que le pic de chaque courbe correspond à un diamètre particulier. Ce diamètre augmente en augmentant la concentration particulaire. Pour 2 cigarettes de marque B la concentration la plus élevée correspond à un diamètre de 0.3  $\mu\text{m}$ , pour 4 cigarettes, on a un diamètre moyen de 0.35  $\mu\text{m}$  et pour une concentration de 32 cigarettes, on a un diamètre moyen de 0.55  $\mu\text{m}$ .

Ces courbes de distribution en taille granulométrique à l'entrée du précipitateur ont mis en évidence le phénomène d'agglomération des particules de fumées pendant le stockage dans le ballon.



**Figure III.3 :** Distribution en nombre/cm<sup>3</sup> en fonction des classes granulométriques pour différentes concentrations de fumée de cigarettes marque A

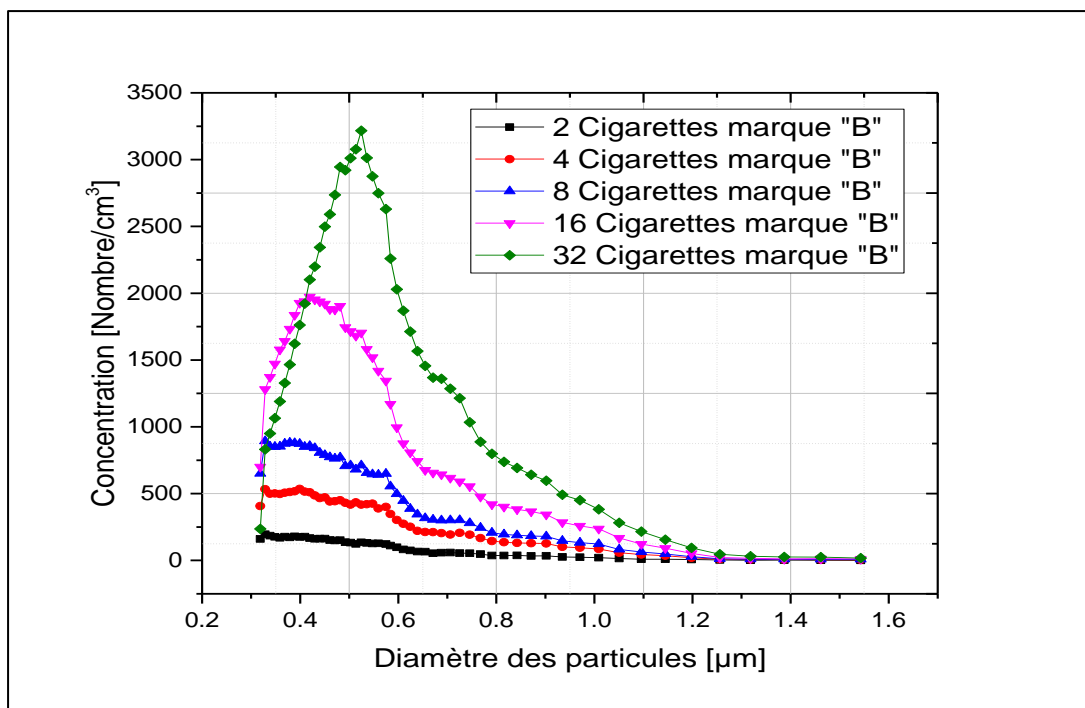


Figure III.4 : Distribution en nombre/cm<sup>3</sup> en fonction des classes granulométriques pour différentes concentrations de fumée de cigarettes marque B.

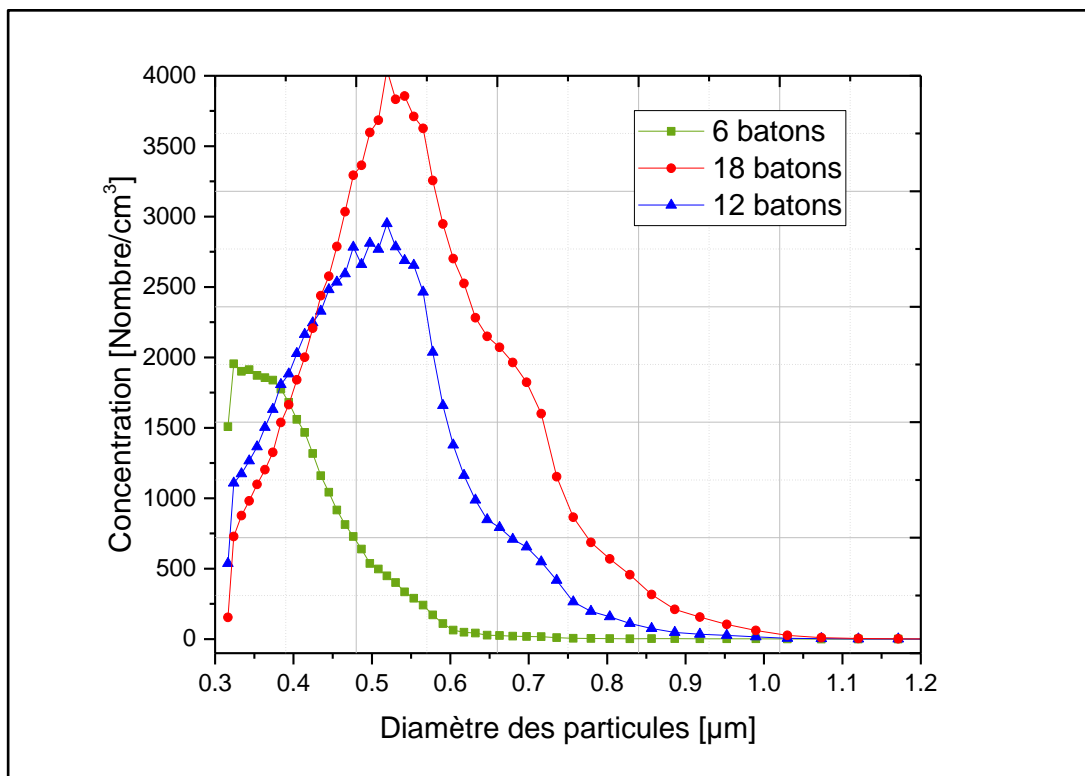


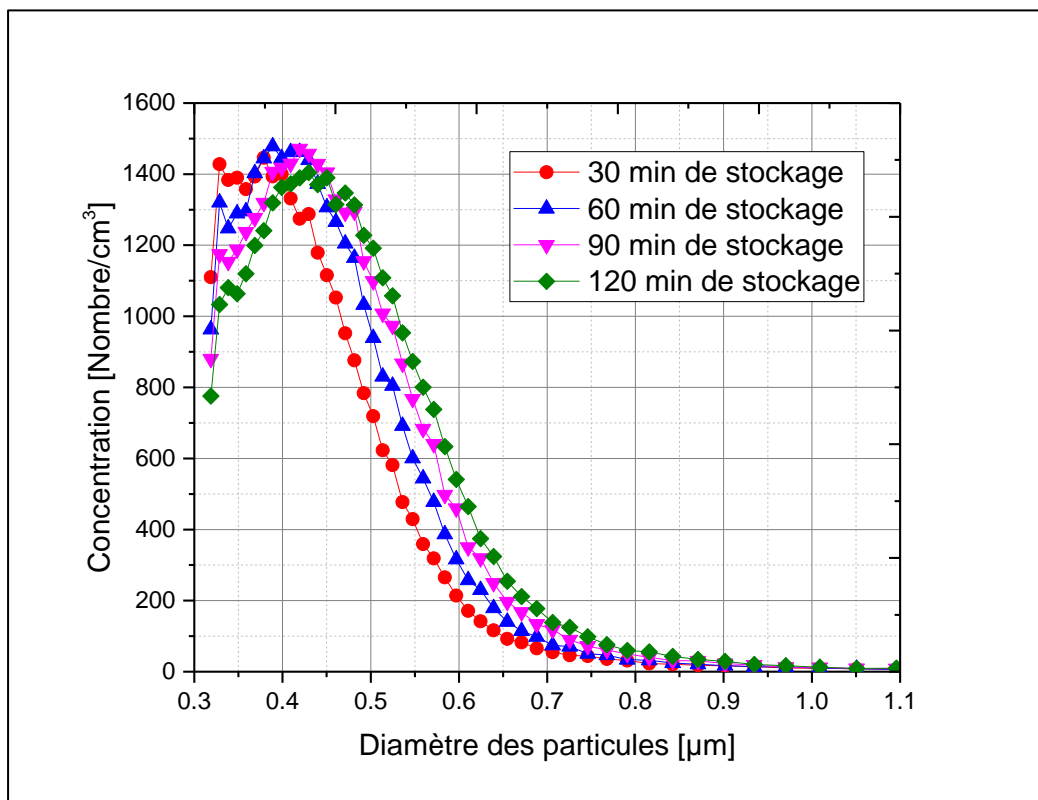
Figure III.5 : Distribution en nombre/cm<sup>3</sup> en fonction des classes granulométriques pour différentes concentrations de la fumée d'encens.

### III.3.3. Variation du temps de stockage de la fumée

Afin d'examiner plus en détail le phénomène d'agglomération qui contribue d'une façon significative sur l'efficacité de collecte dans les précipitateurs électrostatiques, une autre série de mesure est réalisée. En gardant toujours les mêmes conditions de travail, on laisse brûler 8 bâtons d'encens. La fumée ainsi produite est véhiculée par l'intermédiaire d'un ventilateur vers un ballon de stockage puis dans le précipitateur.

Dans un premier temps, on fait passer la fumée directement dans le précipitateur sans stockage, on obtient alors plusieurs courbes qui, une fois lissées sont représentées par une seule courbe. Ensuite, on augmente le temps de stockage de la fumée par un pas de 30 minutes pour chaque série d'expériences.

Les courbes de la figure III-6 représentant la distribution granulométrique, montrent que la concentration des grosses particules ( $d_p > 0,4 \mu\text{m}$ ) augmente avec le temps de stockage de la fumée. Avec le temps, des agglomérats sont constitués à partir des fines particules. Pour cette raison, on assiste à la diminution des fines particules ( $d_p < 0,4 \mu\text{m}$ ) en augmentant le temps de stockage [51].



**Figure III.6:** Distribution en nombre/cm<sup>3</sup> par classes granulométriques en fonction du temps de stockage de la fumée d'encens emmagasinée dans le ballon

### III.4. Rendement fractionnaire pour différentes fumées

L'efficacité de collecte globale de tous les systèmes de traitement des gaz, peut être déterminée grâce à la formule III.1 [42] [48]:

$$\eta_t = 1 - \frac{n_s}{n_e} \quad (\text{III.1})$$

où  $n_e$  et  $n_s$  représentent respectivement, la concentration globale de particules à l'entrée et à la sortie du filtre.

L'efficacité de collecte peut également être déterminée à partir du nombre et de la masse de particules.

En raison de la distribution granulométrique très diversifiée des particules, il peut être intéressant d'exprimer l'efficacité de collecte par classes de taille de particules. Chaque classe correspondant à un diamètre moyen  $d_p$ , cette efficacité appelée efficacité fractionnaire, est définie par la relation suivante pour la classe  $i$  de taille de particules [22] [42]:

$$\eta_f^i = 1 - \frac{m_s(d_p^i)}{m_e(d_p^i)} = 1 - \frac{c_s(d_p^i)}{c_e(d_p^i)} \quad (\text{III.2})$$

où  $m_e(d_p^i)$  et  $m_s(d_p^i)$  sont les masses de particules de la classe  $i$  à l'entrée et à la sortie du précipitateur.

L'efficacité fractionnaire peut également être exprimée en termes de concentrations, par la formules (III.2), où :

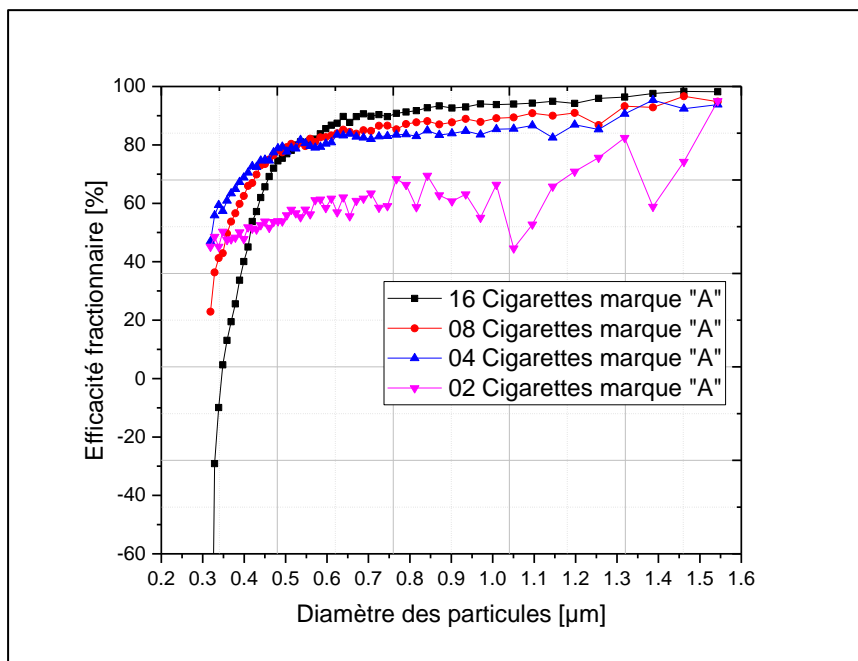
$c_e(d_p^i)$  et  $c_s(d_p^i)$  étant les concentrations moyennes des particules de la classe  $i$  à l'entrée et à la sortie du filtre.

Lorsque l'efficacité de collecte est proche de l'unité, les performances d'un précipitateur peuvent être mieux caractérisées par la "pénétration" qui s'exprime comme suit :

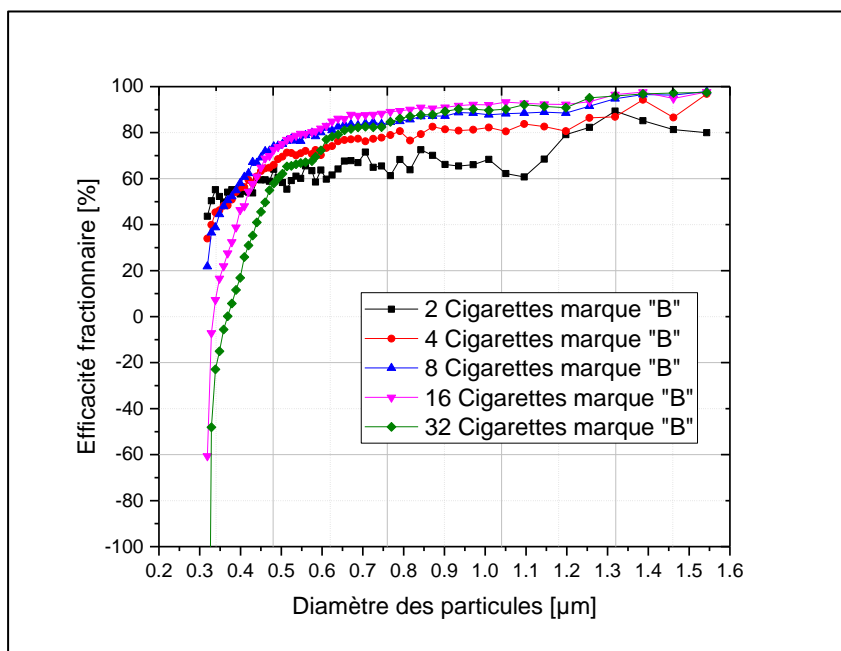
$$\lambda = 1 - \eta_t = \frac{n_s}{n_e} \quad (\text{III.3})$$

En travaillant dans les mêmes conditions expérimentales pour les deux fumées de cigarettes, on observe le même comportement des particules. L'augmentation de la concentration des particules produit la diminution de l'efficacité de collecte des fines particules de diamètre inférieur à 0,4  $\mu\text{m}$ . Ceci est dû à l'augmentation du taux de turbulence dans le précipitateur. La situation est inversée pour les grosses particules ( $d_p > 0,4 \mu\text{m}$ ), ceci

peut être expliqué probablement par le fait que les fines particules sont plus nombreuses à la sortie qu'à l'entrée de la zone soumise au champ de la décharge couronne (Figure III.7 à III.8).

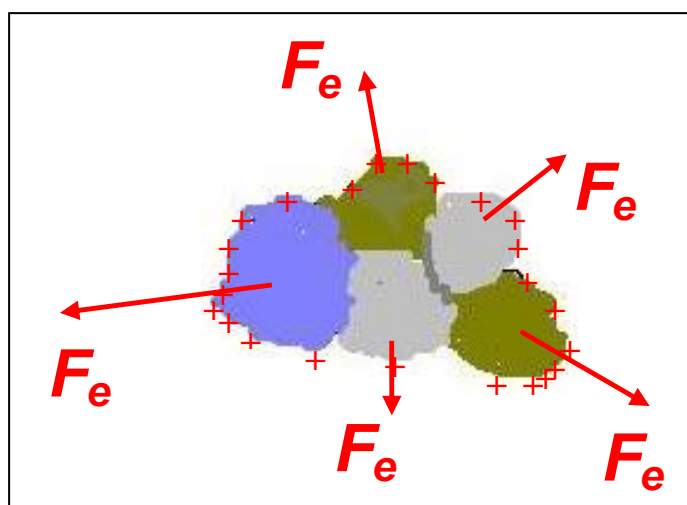


**Figure III.7 :** Efficacités fractionnaires par classes de diamètres en fonction des concentrations de fumée de cigarettes marque A



**Figure III.8:** Efficacités fractionnaires par classes de diamètres en fonction des concentrations de fumée de cigarettes marque B

Les agglomérats qui se forment sous l'effet de la collision des fines particules peuvent être assimilés à de grosses particules de formes irrégulières et qui ont des liaisons très fragiles. Quand ces agglomérats entrent dans la zone active du précipitateur, ils sont soumis au phénomène de charge par champ électrique. Une fois chargé, chaque constituant de cet agglomérat va avoir une charge électrique de même signe que la polarité de la tension utilisée (polarité positive dans notre cas). Sous l'effet de la répulsion coulombienne, les constituants de cet agglomérat vont se disperser et forment ainsi de fines particules ( $d_p < 0,4 \mu\text{m}$ ) (Figure III.9).



**Figure III.9 :** Schéma descriptif des forces répulsives coulombiennes qui s'exercent sur les différents agglomérats [42].

Les expériences menées pour prouver l'existence ou pas de la dispersion pour des diamètres inférieurs à  $1 \mu\text{m}$  ont prouvé qu'on peut généraliser ce phénomène pour différents genres de fumées. Dans ce qui va suivre, on tentera de prouver la généralisation de ce phénomène pour différentes poudres.

### III.5. Rendements fractionnaires pour différentes poudres

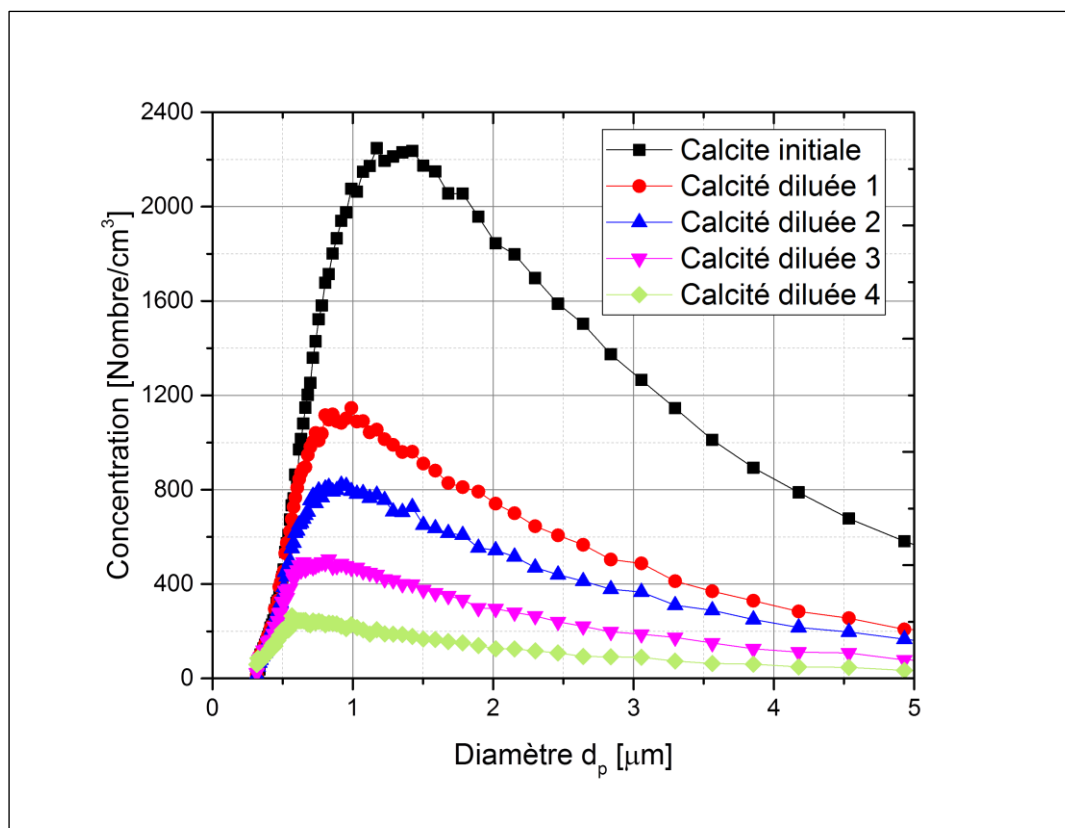
#### III.5.1. Calcite

Le même dispositif expérimental est utilisé pour deux genres de poudres, la calcite et des cendres extraites du troisième champ de l'électrofiltre d'une centrale thermique brûlant du charbon en France.

On commence par casser les agrégats formés par la calcite en utilisant un vibro-transporteur relié à une source variable de pression. On obtient ainsi un fluide de poussières véhiculé par un aspirateur situé en aval de cette installation, ce dernier est homogénéisé grâce à un grand ballon.

Concernant les figures III.10-III.11, la première courbe est celle qu'on a obtenue en filtrant la poudre de calcite initiale, la deuxième est celle obtenue en faisant une dilution de la concentration de la calcite par l'air. Les autres courbes sont obtenues par des dilutions successives. La procédure expérimentale est entièrement détaillée dans la section §II.3.4.2.

Les courbes des figures III.12-III.13 montrent que l'efficacité fractionnaire diminue avec l'augmentation de la concentration des particules ; ceci est attribué à l'augmentation du taux de turbulence pour des particules de diamètre inférieur à  $0,6 \mu\text{m}$ . Pour les grosses particules c'est la tendance inverse qui se produit. Ces résultats prouvent qu'il y a brisure d'agglomérats qui se sont formés à partir des fines particules par la répulsion coulombienne.



**Figure III.10 :** Distribution des différentes concentrations à l'entrée du précipitateur par classes granulométriques pour la poudre de calcite



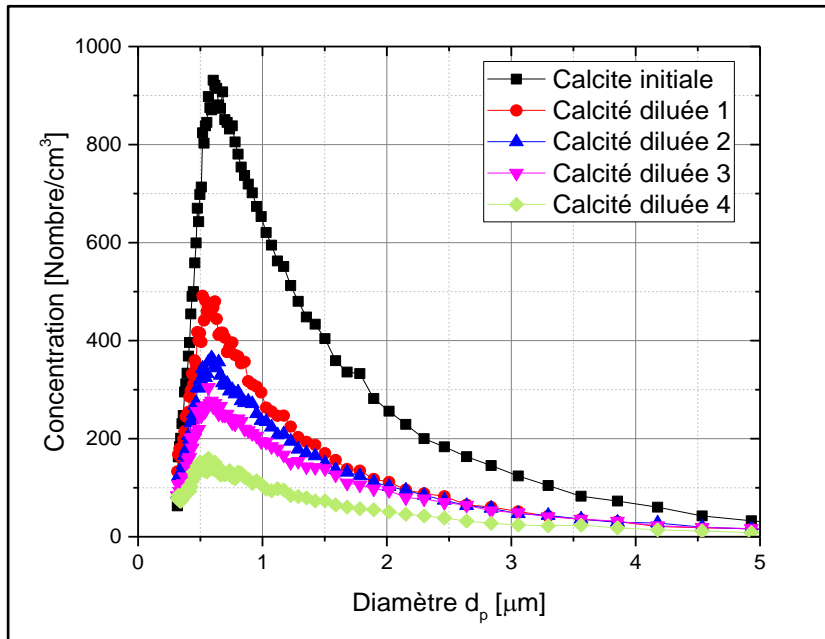


Figure III.11 : Distribution des différentes concentrations à la sortie du précipitateur par classes granulométriques pour la poudre de calcite

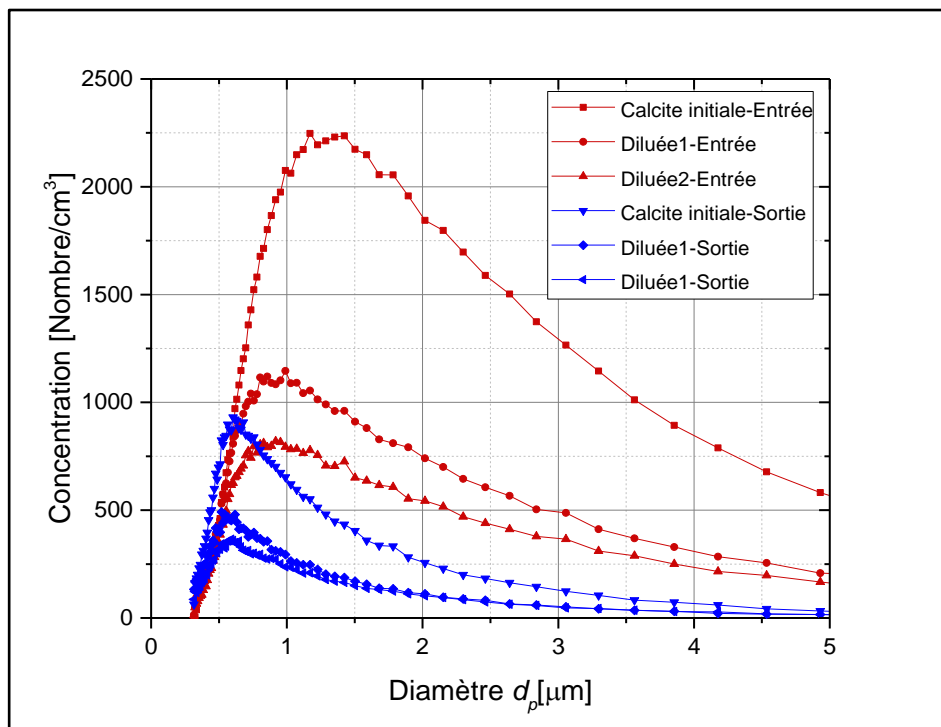
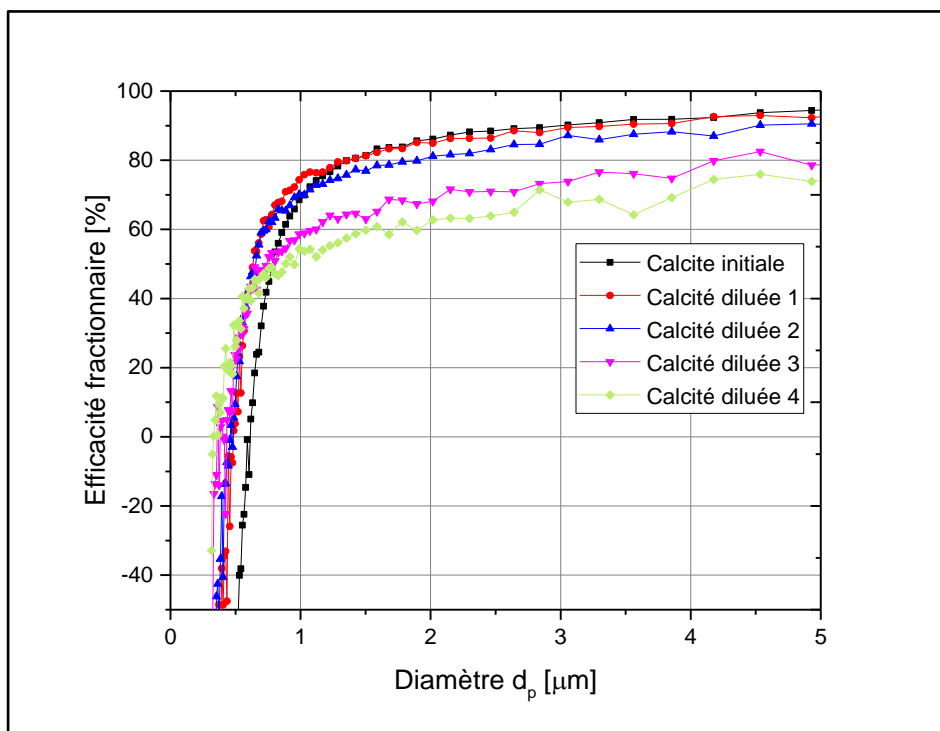


Figure III.12 : Efficacités fractionnaires par classes granulométriques pour différentes concentrations des cendres extraits d'une centrale thermique



**Figure III.13** : Efficacités fractionnaires par classes granulométriques en fonction des différentes concentrations de la poudre de calcite

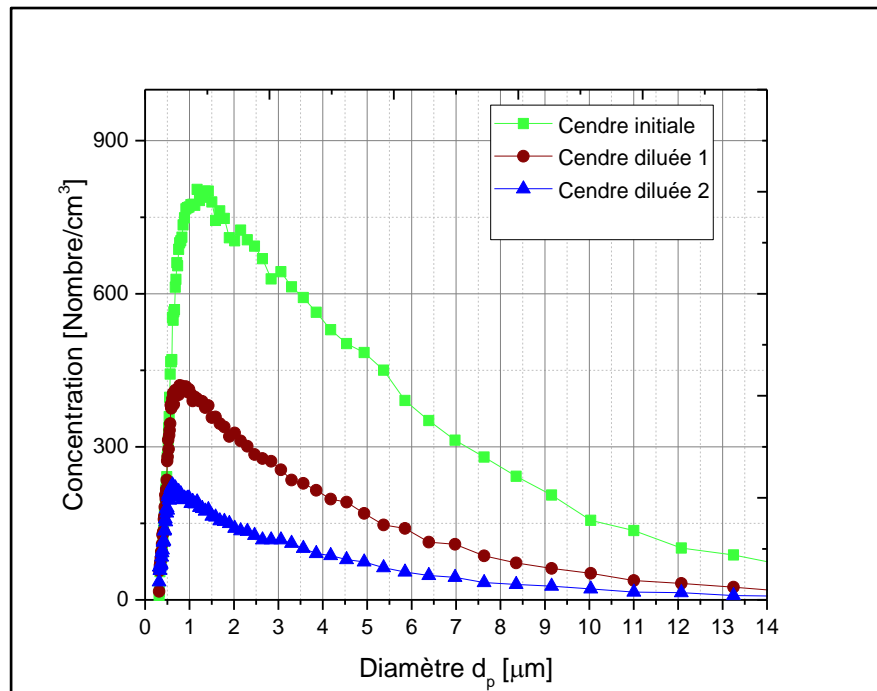
### III.5.2. Cendres

La procédure expérimentale expliquée dans la section précédente est reproduite pour des cendres extraites d'une centrale thermique en France, en faisant deux dilutions de cette poudre avec l'air, avec une pression de 4.8 Bar.

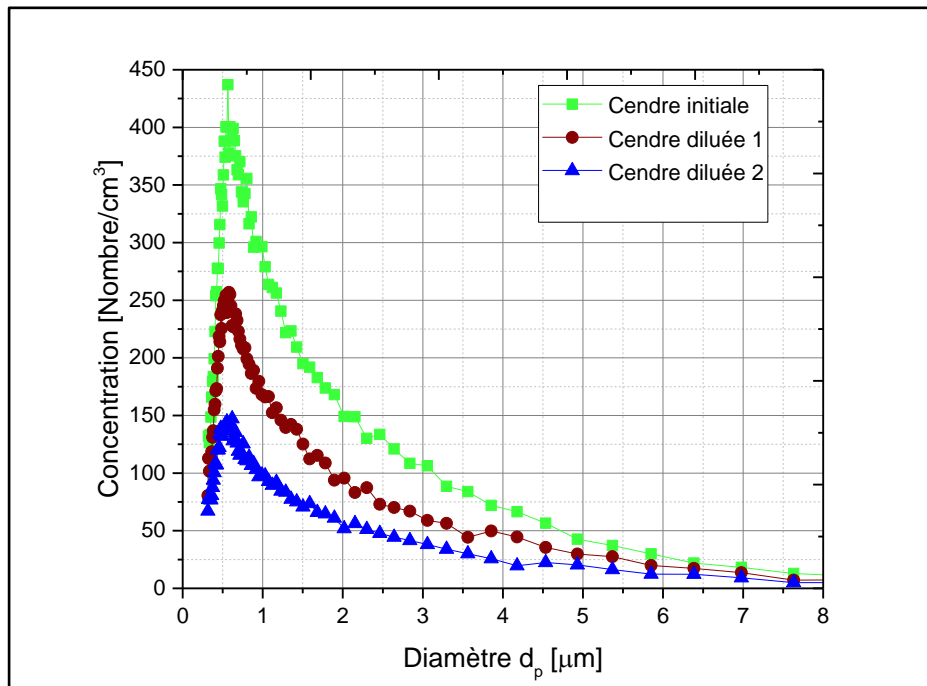
Les mêmes observations obtenues précédemment avec les différentes fumées et poudres sont établis par les courbes des figure III.14 à III-16. Ces courbes démontrent qu'une grande partie des fines particules qui se sont agglomérées subissent un éclatement sous l'effet de la répulsion coulombienne lors de leur passage dans la zone de décharge couronne. Ceci explique le rendement fractionnaire négatif aperçu dans cette figure.

Pour des fortes concentrations de fumée, on obtient un taux de collecte négatif pour les particules de faible diamètre (0,3 à 0,5  $\mu\text{m}$ ) caractéristiques spécifiques pour les cendres utilisées dans ces essais. Ceci signifie que les très fines particules sont plus nombreuses à la sortie qu'à l'entrée de la zone soumise à la décharge couronne et que l'on a donc une création de très fines particules dans cette zone. La seule explication plausible est que l'on est en présence d'un phénomène de brisure ou de désintégration de particules en plus fines particules. Ce phénomène a une incidence importante car il fait plus que compenser la

réduction attendue avec  $c_0$  du taux de collecte des plus grosses particules ( $d_p > \sim 0,5 \mu\text{m}$ ) et il accentue fortement la tendance à la diminution de  $\eta$  avec  $c_0$  pour les plus fines [22] [42] [48].



**Figure III.14 :** Distribution des différentes concentrations à l'entrée du précipitateur par classes granulométriques pour des cendres extraites d'une centrale thermique



**Figure III.15 :** Distribution des différentes concentrations à la sortie du précipitateur par classes granulométriques pour des cendres extraites d'une centrale thermique.

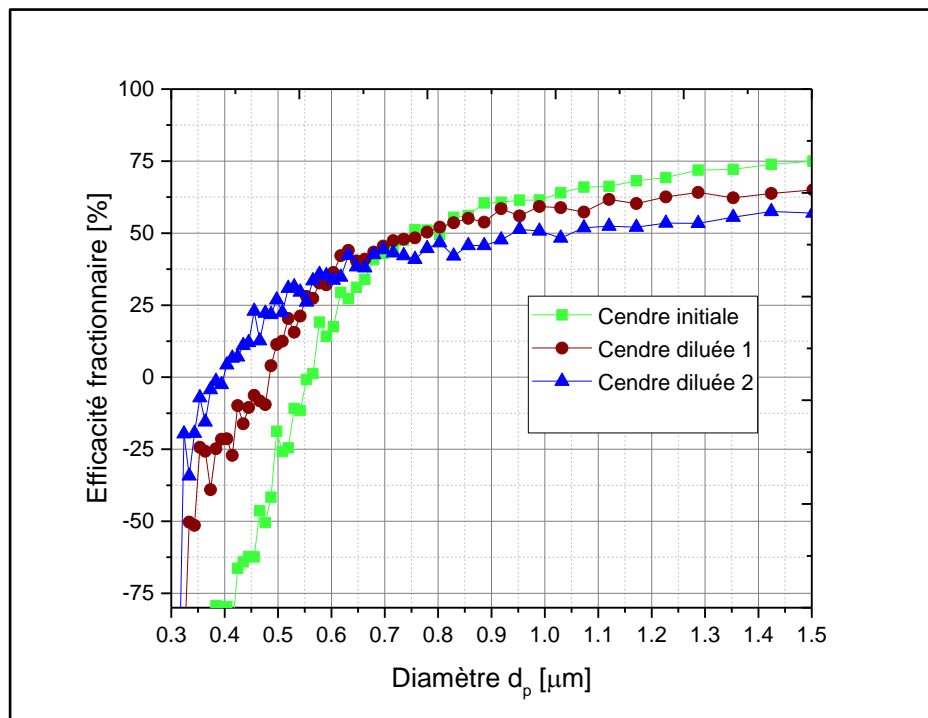


Figure III.16 : Efficacités fractionnaires par classes granulométriques pour différentes concentrations des cendres extraites d'une centrale thermique.

## III.6. Etude numérique du couplage entre l'écoulement électro-hydrodynamique et les fines particules

### III.6.1. Le flux électro-hydrodynamique

Le flux électro-hydrodynamique (EHD) est un flux de gaz électriquement neutre provoqué par des ions générés par effet corona qui le traversent [52] [53].

De nombreux aspects de ce phénomène de mouvement de gaz tels que la distribution des champs électriques et des charges, la dynamique des fluides et le transfert de chaleur ont été étudiés sur une large gamme d'applications comme la filtration de l'air, et bien d'autres

Cependant, le flux EHD implique une interaction entre le champ électrique, le mouvement des ions, le flux de l'électricité et les molécules de gaz neutre, et est décrit par un système d'équations non linéaires couplées [54] [55].

Les solutions analytiques ne pouvant être obtenues que pour un nombre très limité de cas avec la géométrie la plus simple, la modélisation numérique du flux EHD est devenue essentielle pour le développement et l'optimisation de technologies.

Bien que plusieurs techniques et approches numériques ont été développées, beaucoup d'entre elles ont des limites, utilisent certaines simplifications, nécessitent des données expérimentales préalables ou ne sont tout simplement pas pratiques à utiliser.

De nombreux efforts de modélisation antérieurs ne tiennent compte que des interactions électrostatiques. Pour une modélisation précise, cependant, il est important d'inclure les effets de la dynamique des fluides et l'équation complète de transfert de charges.

Le but du travail qui va suivre est de démontrer que le courant ionique à base de corona et le flux d'air induit peuvent être modélisés avec succès pour une géométrie complexe à l'aide de COMSOL multiphysics. C'est un logiciel commercial qui effectue la multi physique basée sur des équations de modélisation pour différents processus physiques en appliquant la méthode des éléments finis. Les résultats numériques sont présentés et comparés aux résultats expérimentaux afin de valider l'hypothèse d'agglomération et de dispersion [56] [57] [58].

### III.6.2. Équations régissant l'écoulement électro-hydrodynamique

Le flux électro-hydrodynamique généré par la décharge couronne et le mouvement du gaz est décrit par les équations citées ci-dessous [59] [60] [27].

Le potentiel électrique  $V$  est régi par l'équation de Poisson, où la densité de charge d'espace générée par effet couronne joue un rôle primordial.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_c}{\varepsilon_0} \quad (\text{III.4})$$

où  $\rho_c$  la densité de charge d'espace et  $\varepsilon_0$  est la permittivité diélectrique du vide.

Le potentiel électrique est défini à partir de l'intensité du champ électrique  $E$  comme suit :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (\text{III.5})$$

Le courant électrique dans la zone de dérive est une combinaison de trois effets: la conduction (mouvement des ions sous le champ électrique par rapport au flux d'air entier), la convection (transport des charges avec le flux d'air) et la diffusion. Par conséquent, la densité de courant  $\vec{J}$  est donnée par :

$$\vec{J} = \mu_i \rho_c \vec{E} + \rho_c \vec{U} - D\vec{\nabla}\rho_c \quad (\text{III.6})$$

où  $\mu_i$  est la mobilité des ions de l'air dans un champ électrique,  $\vec{U}$  est le vecteur vitesse du flux d'air et  $D$  est le coefficient de diffusivité des ions. La condition de continuité donne l'équation de la densité de courant :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{III.7})$$

La partie dynamique de ce problème est décrite par les équations de Navier-Stokes et l'équation de continuité pour un débit d'air incompressible en régime permanent

$$\rho_{air} \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U} = -\vec{\nabla} p + \mu_{air} \nabla^2 \vec{U} - \rho_c \vec{\nabla} V \quad (III.8)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (III.9)$$

où  $\rho_{air}$  est la densité de l'air,  $p$  est la pression de l'air et  $\mu_{air}$  est la viscosité dynamique de l'air.

Ce système d'équations est soumis aux conditions aux limites appropriées pour la modélisation de l'écoulement EHD avec le logiciel COMSOL 5.5.

### III.6.3. Modélisation numérique pour les particules submicroniques

#### III.6.3.1. Hypothèses simplificatrices

L'effet couronne qui a lieu dans une zone assez restreinte au voisinage d'une électrode de petit rayon de courbure (fil, lame, pointe, etc..), fait intervenir divers processus (ionisation par électrons, attachement des électrons, recombinaison, photo ionisation, etc..) qui conduisent à des modèles compliqués. Le degré de complexité du problème est très élevé dans la plupart des situations pratiques et le temps de calcul est extrêmement long. Dans la plupart des travaux sur la distribution de charge d'espace, les auteurs négligent la zone d'ionisation au voisinage de l'électrode injectrice. Dans ce cas la formulation de la condition concernant la densité de charge d'espace sur l'électrode siège de l'effet couronne constitue le point crucial [61].

L'hypothèse de Kaptzov est couramment acceptée ; elle dit que pour la décharge couronne, quelque soit la tension appliquée, la valeur du champ électrique à la surface de l'électrode injectrice reste égale à celle existant au seuil d'amorçage de l'effet couronne. Une valeur approchée est donnée par la formule empirique de Peek. Cette condition portant sur le champ à la surface de l'électrode injectrice n'est pas correcte mathématiquement ni même physiquement. En effet l'équation de conservation de la charge est une équation aux dérivées partielles du premier ordre pour la densité de la charge (diffusion négligée) et la condition au contour qui doit lui être associée concerne les valeurs de la charge sur l'injecteur, c'est-à-dire au départ des trajectoires des ions [59] [62].

L'algorithme présenté à la figure III.17, montre la procédure à suivre pour trouver la solution numérique [47] [28].

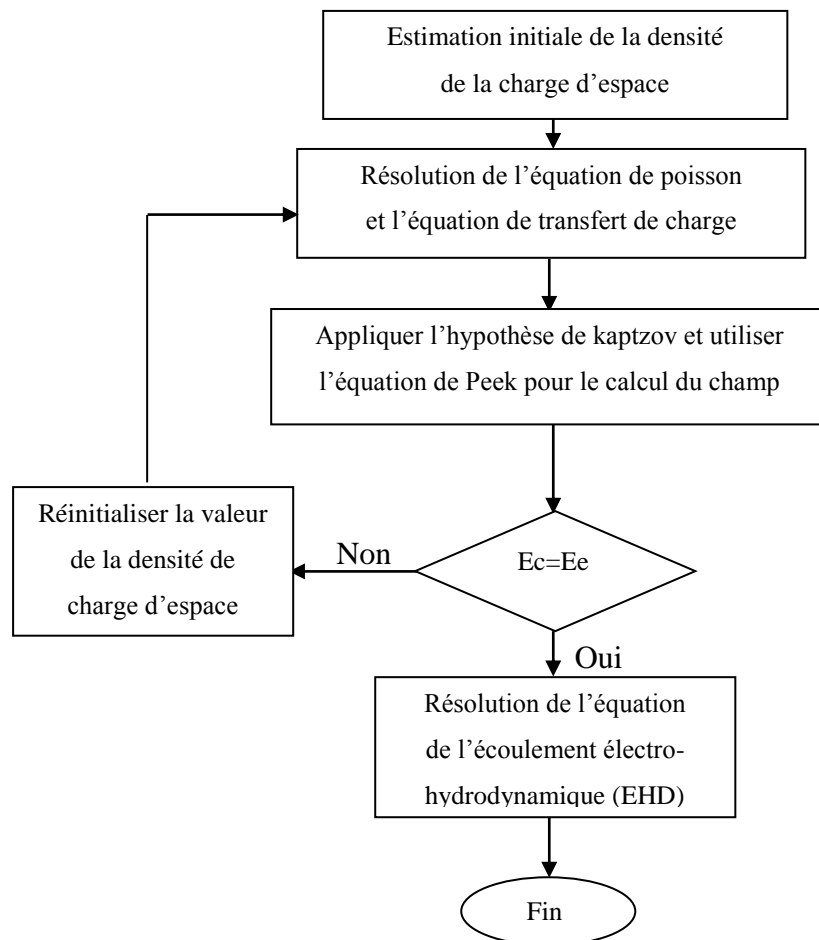


Figure III.17: Procédure de modélisation de l'écoulement électrohydrodynamique

### III.6.2.2. Domaine de géométrie et conditions aux limites

Chaque équation pour les systèmes présentés dans le paragraphe précédent contient les deux variables, le potentiel  $V$  et la densité volumique de charge d'espace  $\rho_c$ . Pour définir le problème en vue d'obtenir une solution unique, il faut associer les conditions aux limites adéquates concernant chaque variable. Les conditions aux limites concernant le potentiel  $V$  sont évidentes physiquement et mathématiquement : le potentiel  $V$  est constant sur les deux électrodes, donc on a les conditions de Dirichlet. Les conditions de Neumann sont toujours proposées sur les axes de symétrie du domaine; dans ce cas la condition concerne une partie du système, par exemple un fil entre deux plans parallèles. La condition de Neumann  $\partial V/\partial n$  est imposée sur chaque ligne séparatrice [36].

Pour résoudre l'équation de Poisson, on tient compte de deux conditions aux limites appelées conditions de Dirichlet [17] [62]:

- La tension de l'électrode active est égale à la tension appliquée  $V_e = V_{\text{appliquée}}$ .

- La tension aux niveaux des plaques reliées à la terre est égale à zéro  $V_p=0$ .

Les conditions de Newman sont imposées sur toutes les frontières comme suit :

$$\frac{\partial V}{\partial n} = 0 \text{ et } \frac{\partial \rho_c}{\partial n} = 0 .$$

Le domaine de simulation est donné par la figure (III-18) [63] [64]:

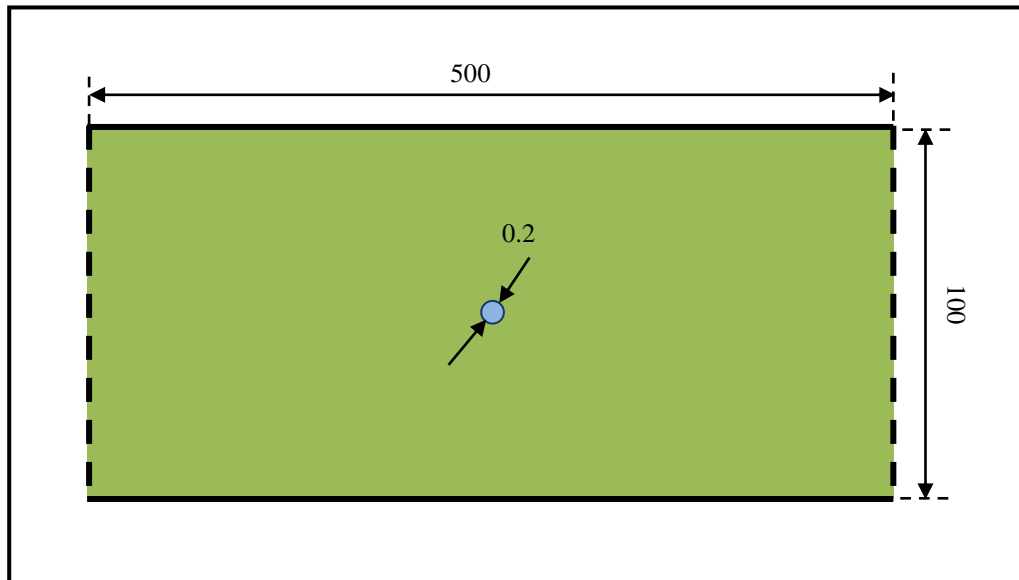


Figure III.18 : Domaine de simulation avec les conditions aux limites (mm)

### III.6.2.3. Maillage du domaine de simulation

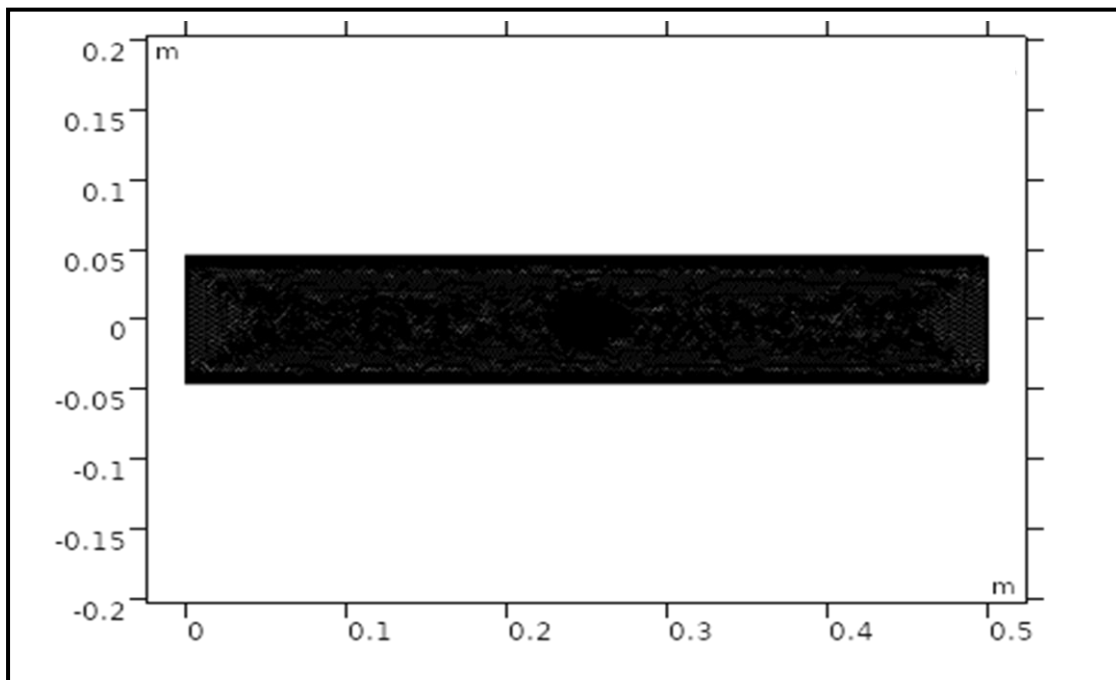
Avant de passer aux résultats de modélisation, la méthode des éléments finie (MEF) nécessite un maillage du domaine de simulation. Les frontières de la géométrie sont discrétisées en éléments de frontière triangulaires ou quadrilatéraux. Si la frontière est courbée, ces éléments ne représentent qu'une approximation de la géométrie d'origine. Les côtés des triangles et des quadrilatères sont appelés bords de maillage et leurs coins sont des sommets de maillage. Un bord de maillage ne doit pas contenir de sommets de maillage à l'intérieur.

Les limites définies dans la géométrie sont discrétisées approximativement en bords de maillage, appelés éléments de frontière (ou éléments de bord), qui doivent être conformes aux éléments de maillage des domaines adjacents. Les faces, les arêtes et les coins sont appelés faces de maillage, arêtes de maillage et sommets de maillage, respectivement.

Dans cette modélisation numérique, un maillage triangulaire extrêmement fin a été élaboré. Etant donné que le champ électrique varie dans l'espace à proximité de l'électrode

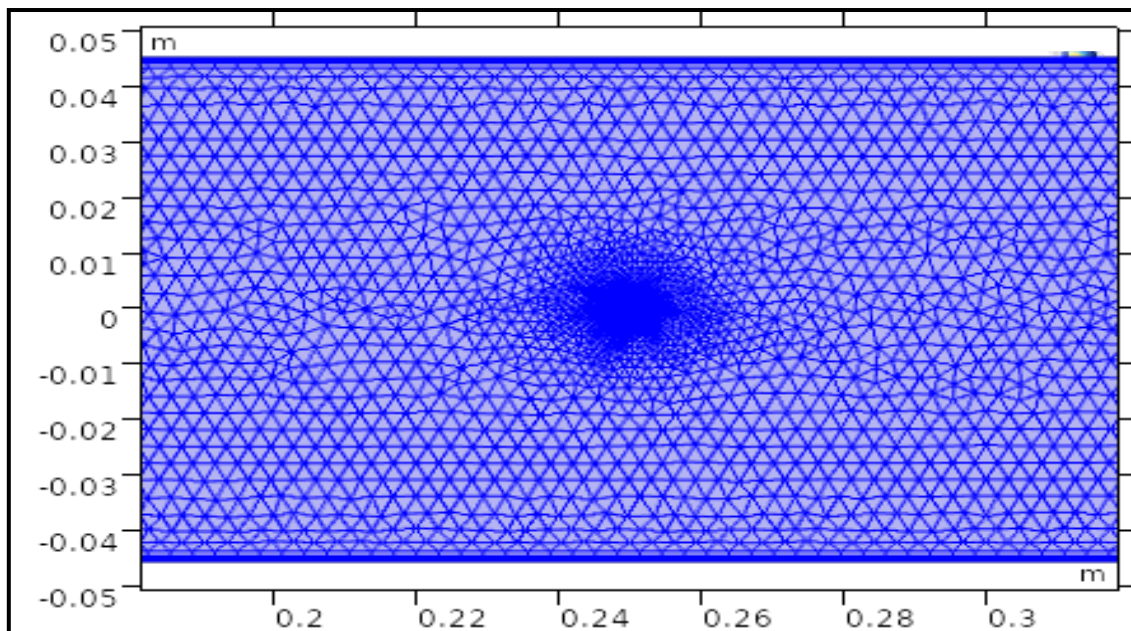


corona, alors un raffinement au niveau de cette dernière est nécessaire ( figure III.19) [46] [65].



**Figure III.19 :** Maillage triangulaire adapté et raffiné selon l'étude.

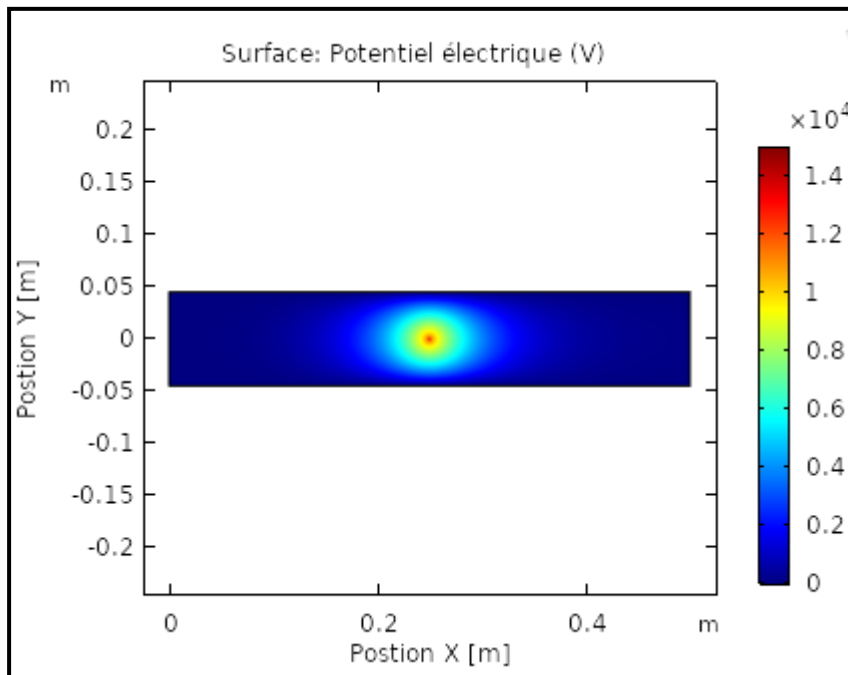
Afin de bien montrer le maillage réalisé, un zoom de la partie active du précipitateur est prise à la figure III.20.



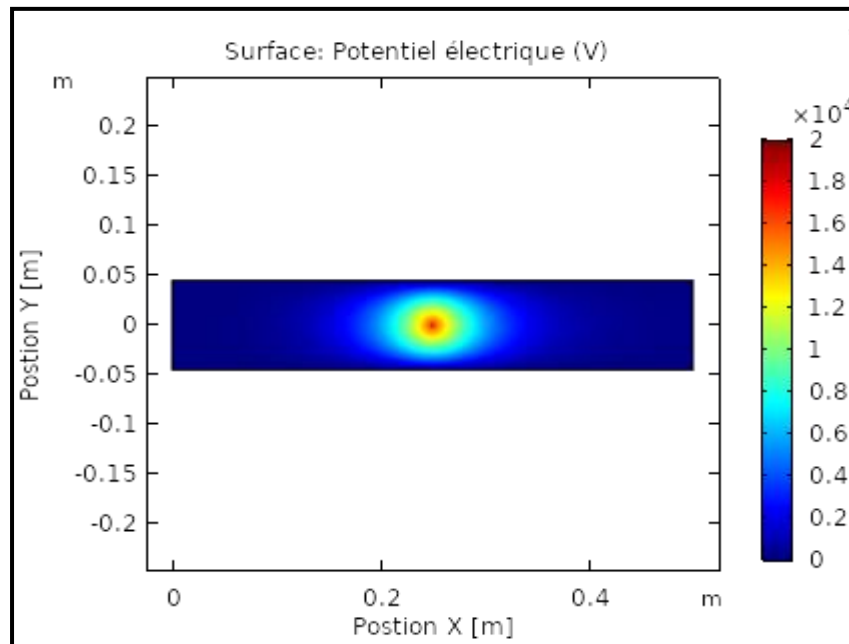
**Figure III.20 :** Zoom sur la partie active du maillage raffiné

### III.6.2.4. Distribution du potentiel électrique

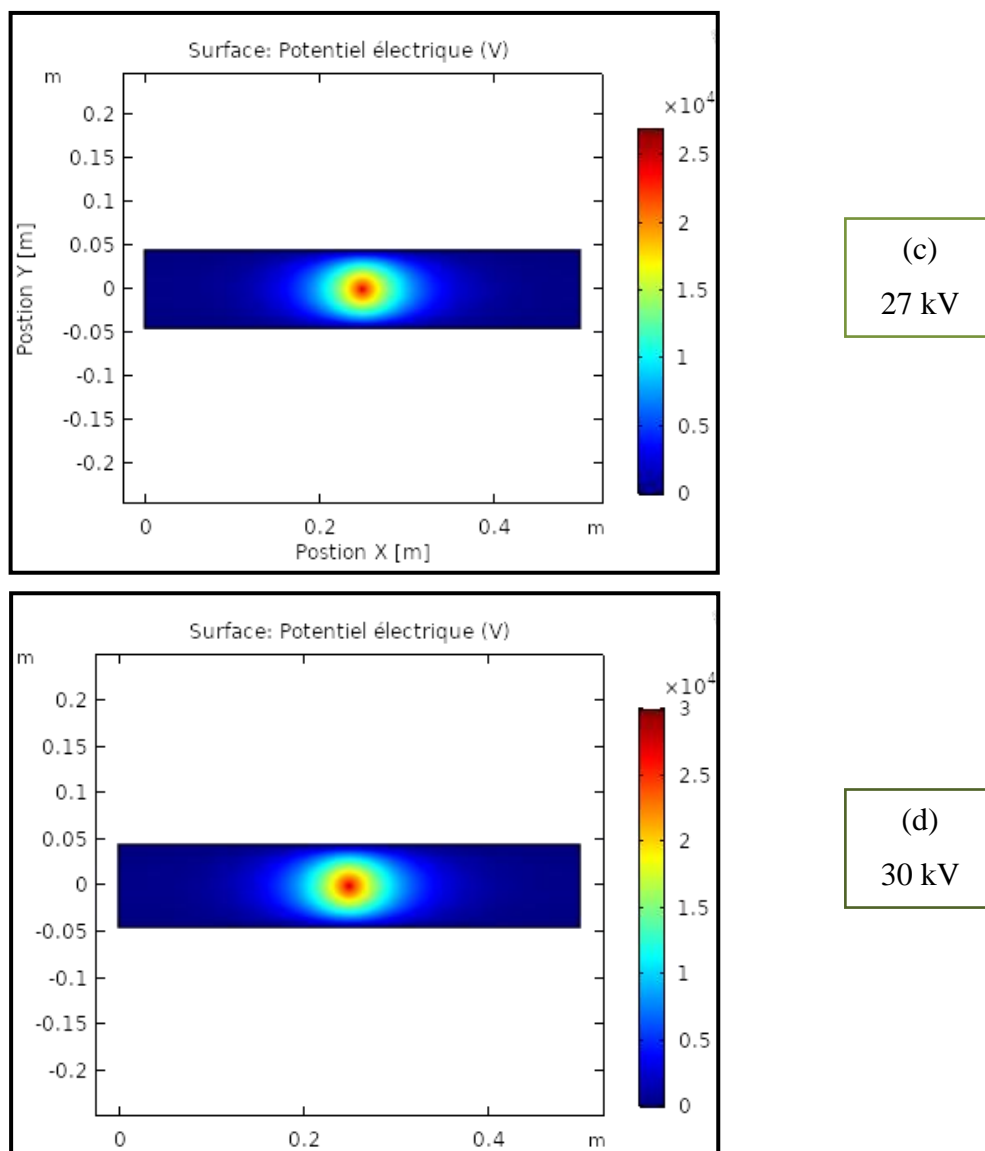
La figure III.21 (a, b, c, d) représente les résultats numériques du profil du potentiel électrique en prenant en considération l'effet de la densité de charge d'espace et le mécanisme de charge des particules. Et surtout en établissant un code calcul pour modéliser l'effet couronne. Cette distribution de potentiel pour les différents niveaux de tension illustre bien le fait d'avoir des valeurs élevées à la surface du fil ionisant et diminuent en allant vers les électrodes de collection.



(a)  
15 kV



(b)  
20 kV



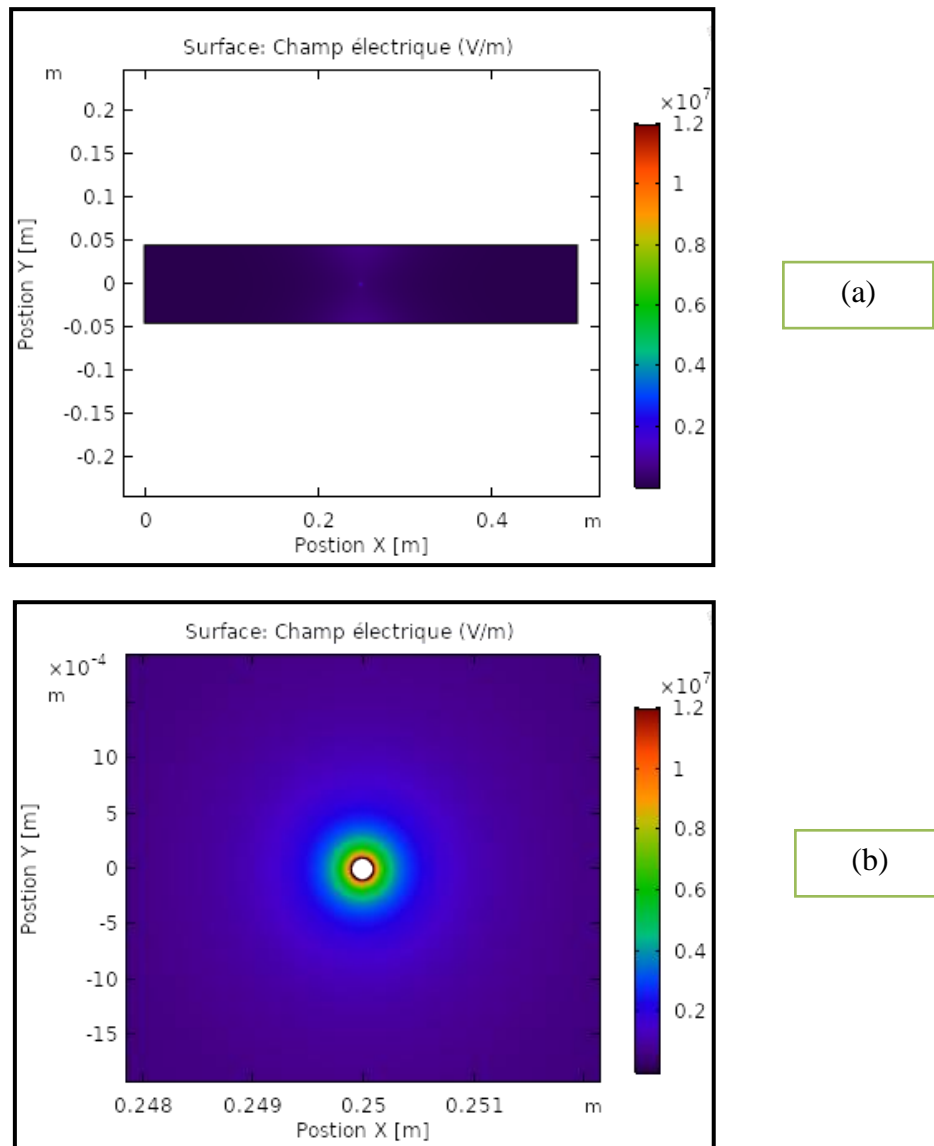
**Figure III.21** : Distribution du potentiel électrique pour différentes valeurs de tensions appliquées.  
(U=15-30 kV)

### III.6.2.5. Profil du champ électrique

L'augmentation de la tension appliquée, c'est-à-dire l'augmentation du champ électrique conduit immédiatement à l'accroissement de la densité de la charge d'espace tendant à réduire le champ électrique à la surface de l'électrode active.

Ces effets contradictoires équilibrent le champ à sa valeur seuil et, comme première approximation, le champ électrique à la surface de l'électrode active est supposé indépendant de la tension appliquée au-delà de la tension seuil.

Cette invariance du champ est souvent utilisée dans les modèles numériques proposés jusqu'à nos jours. Elle est connue sous le nom de « hypothèse de Kaptzov » [66] [38].



**Figure III.22** : Profil du champ électrique pour une tension appliquée  $U=27$  kV.

a) Dimension réelle du précipitateur b) Zoom sur la zone active du précipitateur

### III.6.2.6. Distribution de la charge d'espace générée dans l'espace inter-électrode

La génération de la charge d'espace par la décharge couronne dans un dispositif de précipitation électrostatique peut être modélisée en appliquant des conditions limites électrostatiques et de transfert de charges appropriées à la surface de l'électrode corona et de la zone d'ionisation [36].

Une description des conditions aux limites pour l'estimation de la génération de la charge d'espace est décrite dans cette section.

L'écart entre la couronne et les électrodes collectrices peut être divisé en deux régions, les zones d'ionisation et de dérive. La zone d'ionisation existe à proximité immédiate de l'électrode corona, dans laquelle l'ionisation de l'air se produit, et des ions positifs et négatifs existent. La région de dérive, située à l'extérieur de la zone d'ionisation, contient des ions d'une seule polarité qui ont été chassés de la région d'ionisation par le champ électrique [64].

Pour l'électrode active, l'intensité du champ électrique à la surface de l'électrode corona lisse de rayon  $R_e$  est donnée par la formule empirique de Peek pour l'air dans des conditions standard [24] [36] [62] [66].

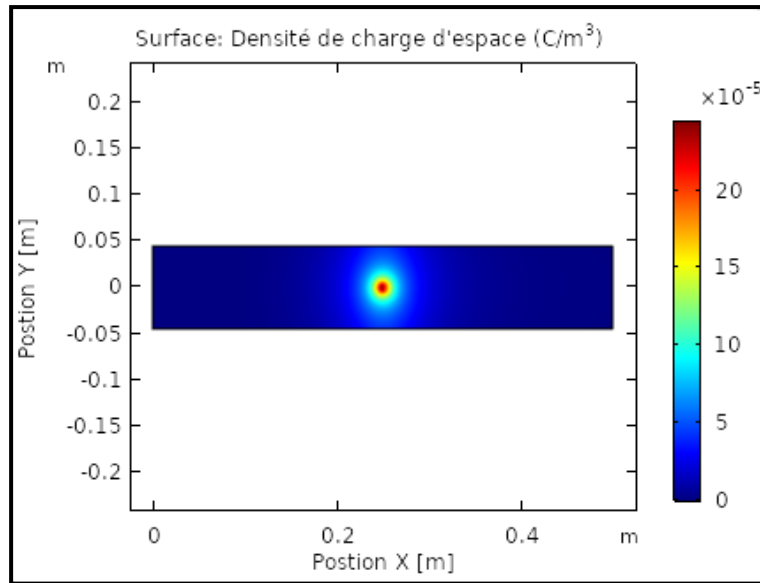
$$E_e = E_0 \left( 1 + \frac{2.62 \times 10^{-2}}{\sqrt{R_e}} \right) \quad (\text{III.10})$$

où le rayon de l'électrode corona  $R_e$  est mesuré en mètres et  $E_0 = 3,31 * 10^6$  V / m est le champ critique de l'air.

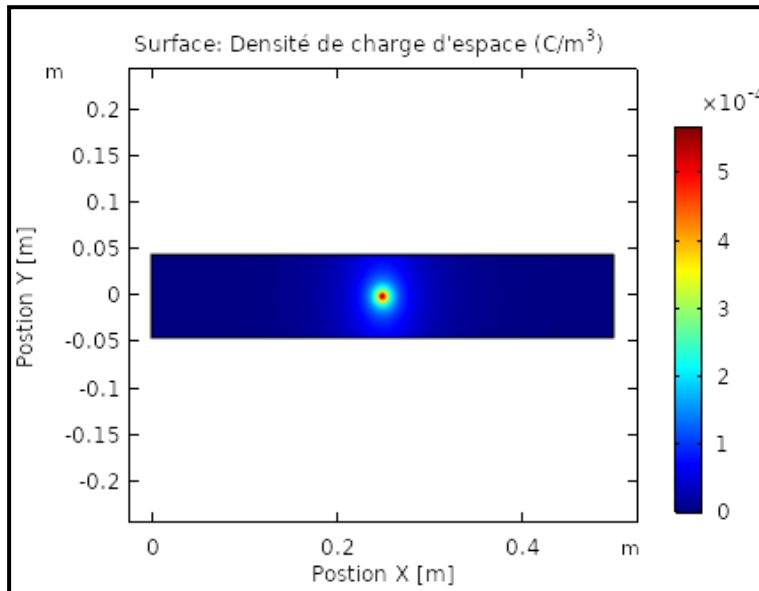
Contrairement à la zone de dérive, la zone d'ionisation contient des charges des deux polarités. Cependant, en raison de la grande différence de mobilité entre les électrons et les ions positifs, la grande majorité du volume de la région d'ionisation est une charge d'espace nette, qui est positive dans le cas d'une couronne positive.

À la surface externe de la zone d'ionisation, l'hypothèse de Kaptsov est faite [66], qui stipule que le rayon de la zone d'ionisation et la force du champ électrique sur la surface du fil restent approximativement constants avec un  $V_e$  changeant une fois qu'une couronne est formée. Cela permet d'estimer la densité de charge de surface sur la surface externe du fil corona en spécifiant le potentiel électrique  $V_e$  et en supposant la force du champ électrique  $E = E_e$  à la surface du fil corona [67] [68] [69].

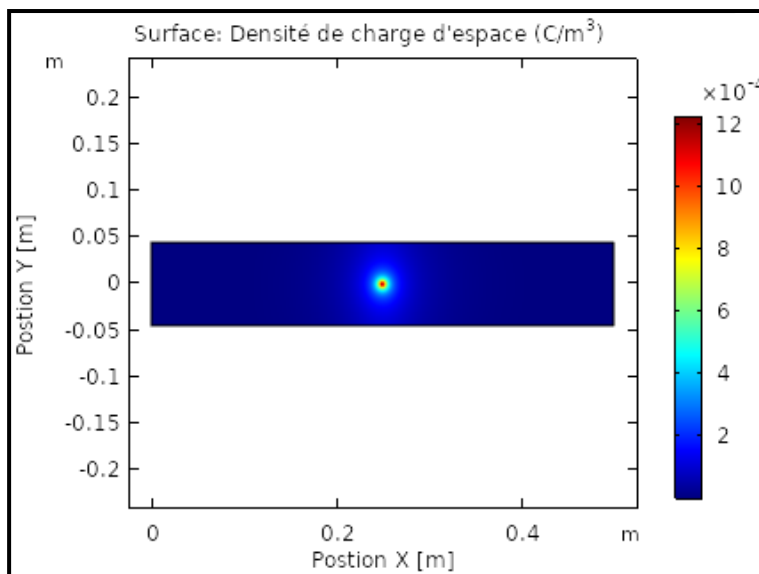
La figure III-24 (a, b, c, d) montre les résultats numériques de la densité de charge d'espace injectée dans l'espace inter-électrode pour différentes tensions appliquées allant de 15 kV à 30 kV. On voit clairement que cette densité est à son maximum au cœur du précipitateur et commence à diminuer en allant vers les électrodes de collecte. Sa valeur est d'autant plus grande que la tension est grande [47] [70] [71].



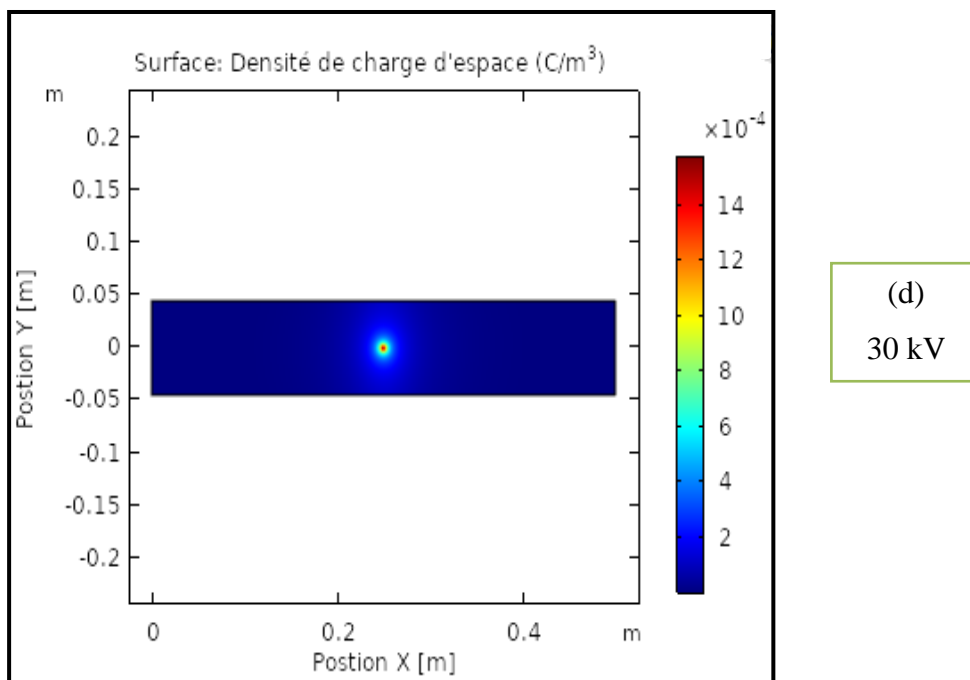
(a)  
15 kV



(b)  
20 kV



(c)  
27 kV



**Figure III.23 :** Distribution de la densité de la charge d'espace générée pour différentes valeurs de tension appliquée (U=15-30 kV)

### III.6.2.7. Trajectoire des particules

Dans cette partie, on s'est intéressé à établir un modèle numérique de la trajectoire des particules qui prend en considération plusieurs phénomènes physique. Le code de calcul mis en œuvre par le logiciel Comsol 5.5 fait intervenir les quatre modules suivants et leur interaction :

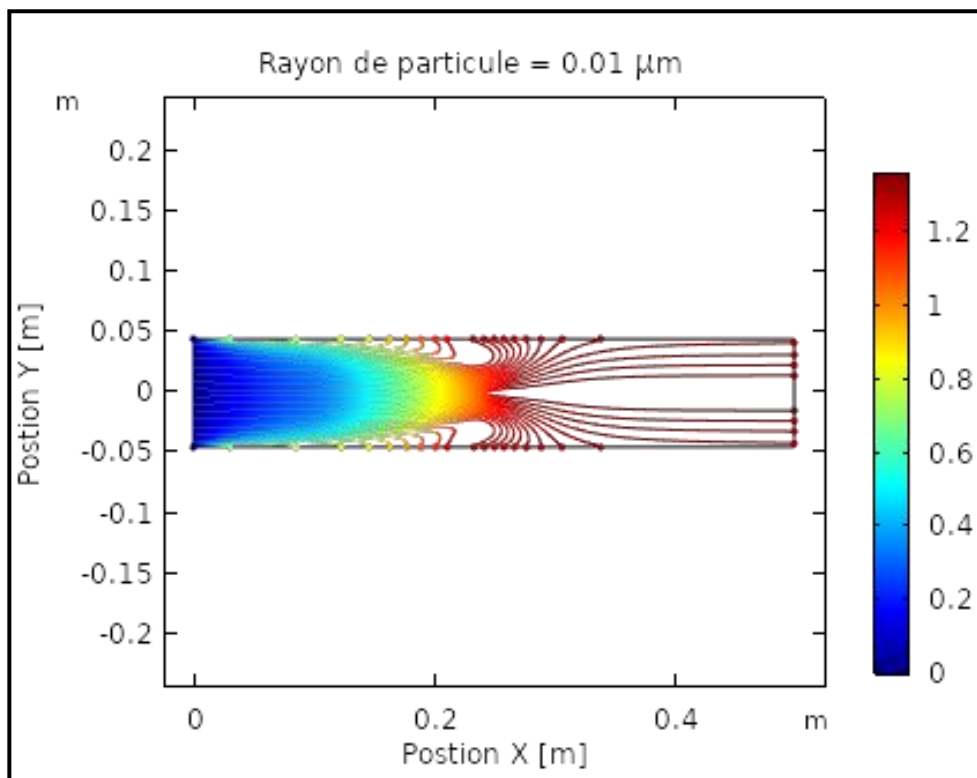
- La décharge couronne en polarité positive pour une configuration (fil – plaques) est modélisée en couplant le module électrostatique et le module transfert de charge.
- La trajectoire des particules chargées est modélisée en couplant le module écoulement laminaire et la trajectoire des particules pour écoulement laminaire.

La charge élémentaire portée par chaque particule représente un facteur très important qui intervient dans la précipitation électrostatique, en même temps, le processus de charge des particules dans un électrofiltre est très complexe et conduit à des valeurs de charge différentes pour des particules identiques. Pour chaque taille granulométrique de particule une distribution de charge plus ou moins différente est établie. Ceci provient principalement du fait que, au cours de la trajectoire de ces particules ; elles passent par des zones différentes,

dans lesquelles on trouve des densités de charge d'espace et l'intensité du champ électrique différentes.

La figure III.24 montre la trajectoire des particules couplée avec la charge élémentaire accumulée des particules et ceci pour plusieurs classe granulométrique. Les particules sont injectées à l'entrée du précipitateur puis sont transportés dans un écoulement primaire et secondaire et ceci en accumulant progressivement des charge par les différents mécanismes de charge ( diffusion, par champ et mixte ).

Les particules se chargent progressivement le long de leur trajectoire, ce qui entraîne des forces électriques qui dévie leur trajectoire dans la direction des électrodes de collection. Le diamètre des particules influence l'équilibre entre la force de traînée et de la force électrique appliquées aux particules et influence par conséquent la trajectoire de la particule et donc l'efficacité de collecte fractionnaire du précipitateur électrostatique [72] [64] [73].





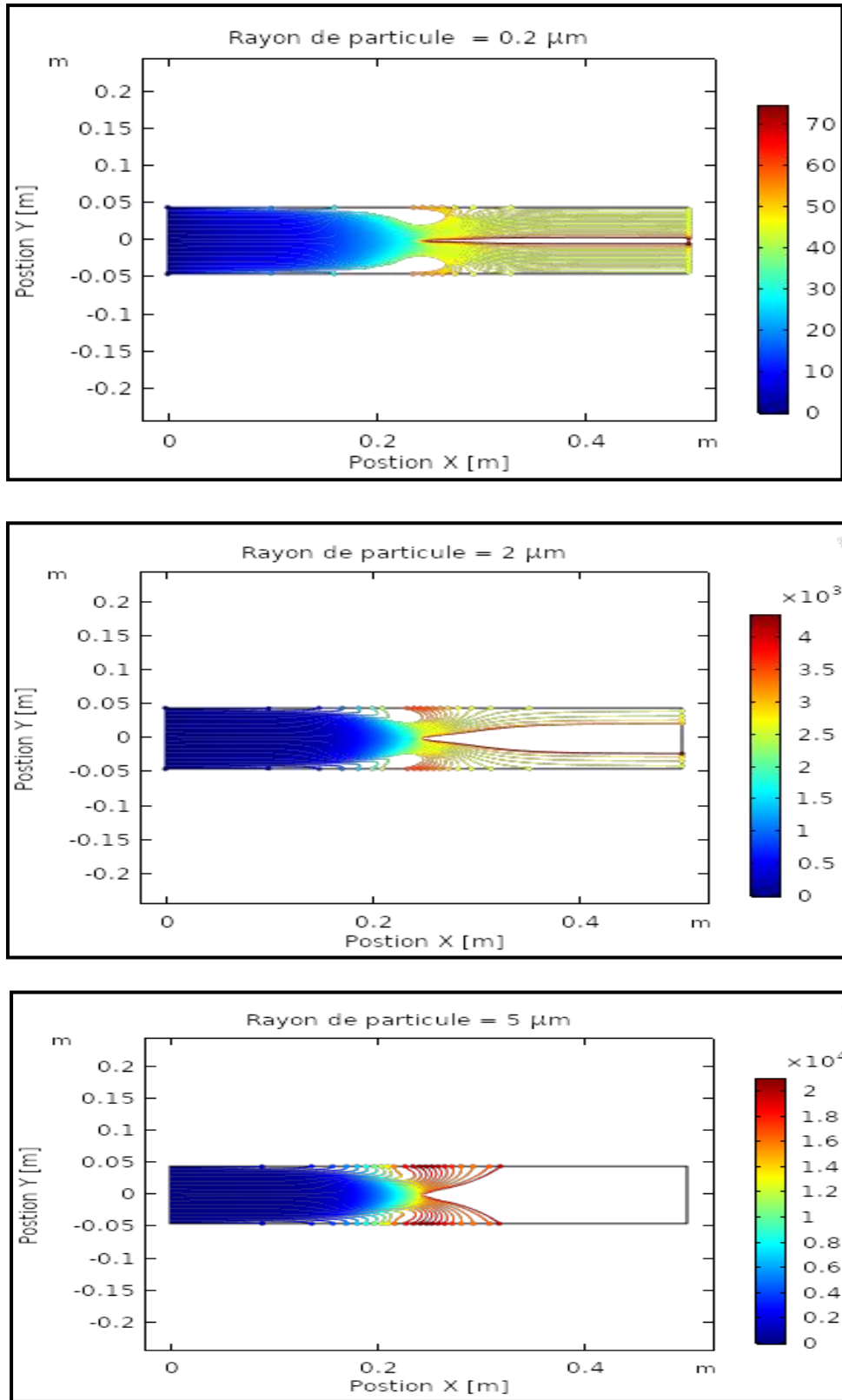


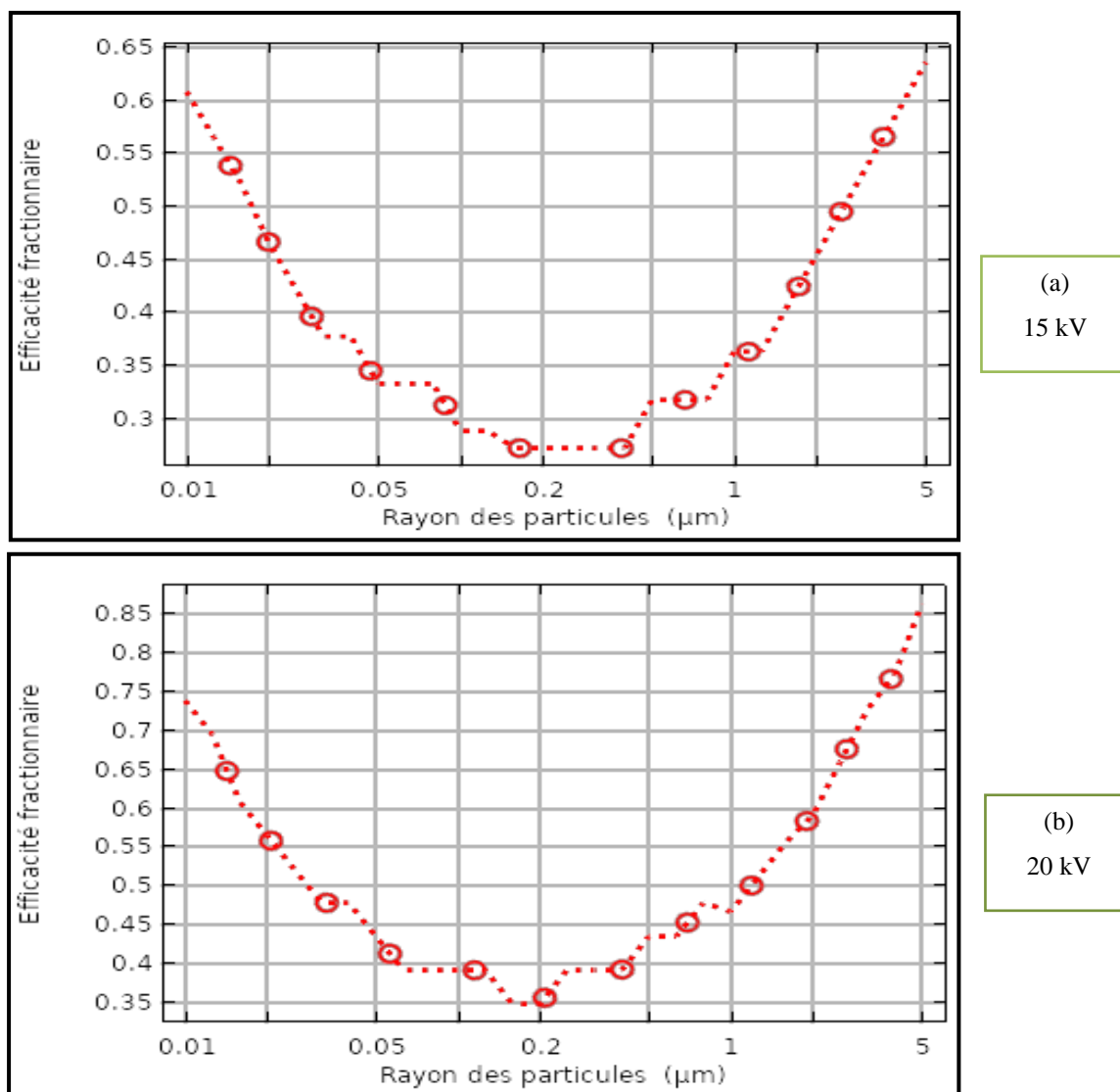
Figure III.24 : Trajectoires des particules pour différentes valeurs du rayon de la particule avec une valeur de tension appliquée ( $U=27$  kV)

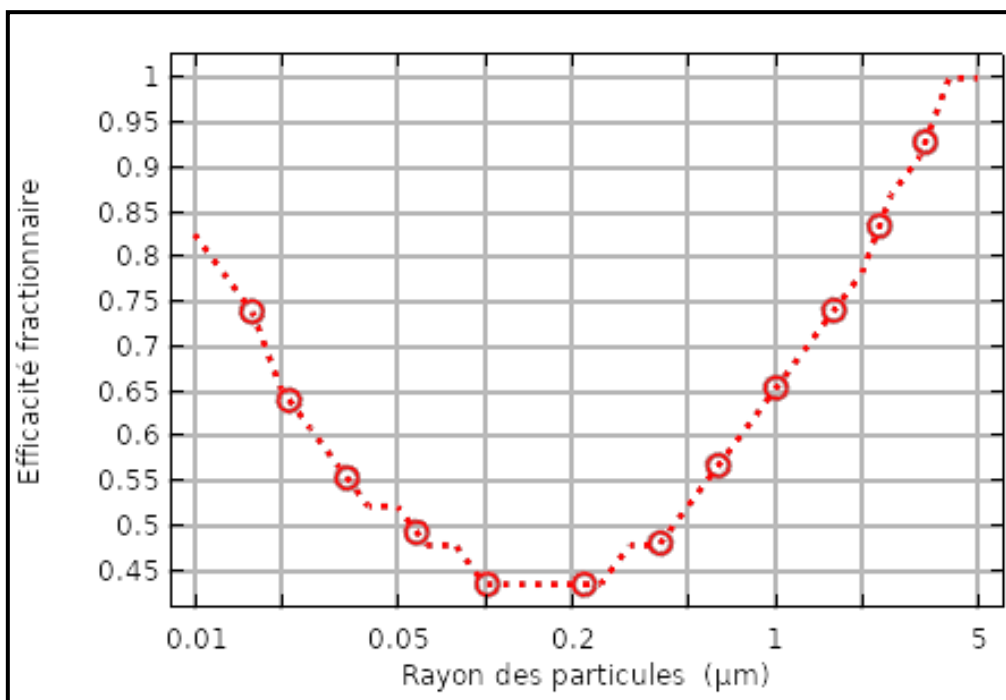
## III.6.2.8

## III.6.2.8. Efficacités fractionnaires

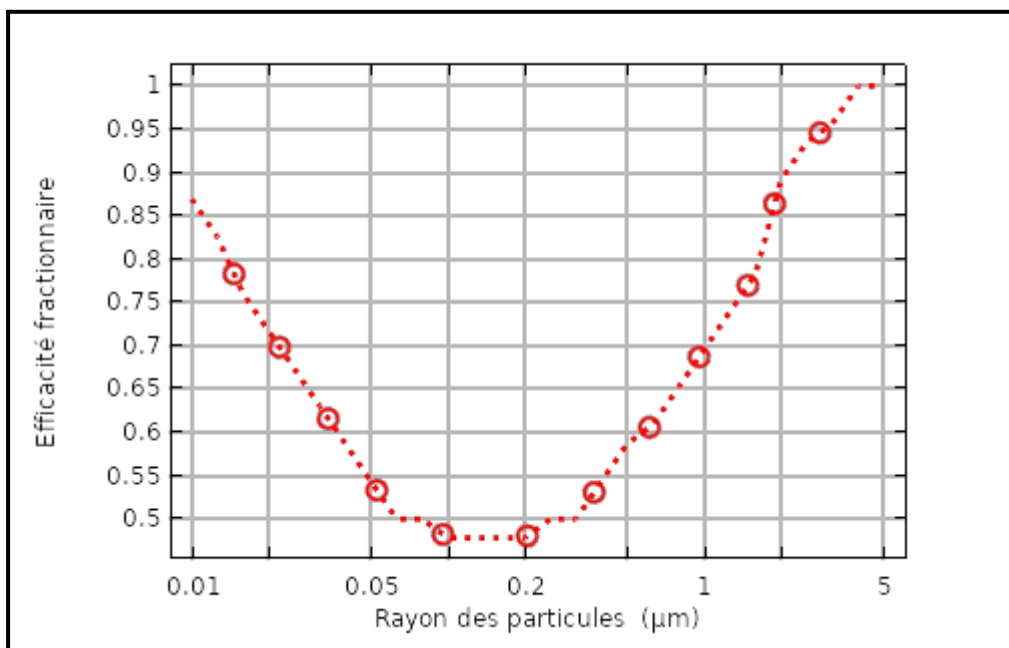
La figure III.25 illustre l'efficacité de collecte fractionnaire en fonction des différentes classes moyennes de diamètres des particules. L'efficacité de collecte est plus grande aux extrémités de ces courbes. Les particules de diamètre plus grand sont collectées plus efficacement car elles atteignent une charge électrique plus élevée, tandis que les particules de diamètre plus petit sont collectées elles aussi efficacement car elles sont soumises à une force de traînée plus petite.

En se référant à la figure I.11, qui représente la variation de la vitesse de migration en fonction du diamètre des particules. On voit que la variation de la vitesse  $w_{th}$  en fonction du diamètre des particules passe par une valeur minimale pour  $d_p \cong 0.25 \mu\text{m}$  [35]. Une faible vitesse de migration diminue le transport des particules vers les plaques collectrices et par conséquent l'efficacité de collecte et inversement [37] [58] [72] [73].





(c)  
27 kV



(d)  
30 kV

Figure III.26 : Efficacité fractionnaire du précipitateur en fonction du rayon des particules pour différentes valeurs de tensions appliquées ( $U=15-30$  kV)

III.7. Conclusion

Les résultats expérimentaux trouvés ont révélé l'existence d'un phénomène très important, qui stipule, qu'en présence d'un champ électrique intense il y a éclatement des agglomérats qui se sont formés à partir de très fines particules dans les différentes fumées de

cigarettes. Une autre étude a également été réalisée avec des particules de natures différentes, comme la fumée d'encens, les particules de calcite et les fines particules de cendres extraites du quatrième champ d'un filtre électrostatique d'une centrale thermique de charbon. Dans tous ces cas, il est montré qu'il existe un processus de désintégration qui semble être très général et de ce fait il constitue un facteur primordial affectant l'efficacité de collecte des fines particules. Ces résultats mettent en évidence deux points essentiels :

- L'influence de la turbulence sur l'efficacité de collecte de très fines particules submicroniques inférieures et surtout la gamme inférieure à  $0,6 \mu\text{m}$ ;

- L'existence d'un phénomène d'éclatement, sous l'effet de charges similaires, des agrégats qui se constituent par agglomération de très fines particules dans les différentes fumées et la généralisation de ce phénomène de brisure des agglomérats pour différentes poudres.

## **Chapitre IV**

---

### **Analyse de la Distribution de la Charge des Particules le Long du Précipitateur**

## *Chapitre IV*

### *Analyse de la distribution de la charge des particules le long du précipitateur*

#### **IV.1. Introduction**

Les précipitateurs électrostatiques sont largement utilisés comme collecteurs de particules en suspension à cause de leur efficacité élevée de collecte de particules. Cette efficacité dépend de plusieurs processus, la charge des particules est l'un des plus importants.

On trouve dans la littérature beaucoup de travaux effectués sur le phénomène de charge en fonction du diamètre de la particule et en fonction du temps de séjour,...etc [41] [74] [75]. Cependant, peu de travaux ont été effectués pour la détermination de la charge électrique acquise par l'effet corona par les particules le long de l'ESP afin de caractériser la distribution de la charge des particules.

L'objectif de ce chapitre est la mesure du rapport « charge/masse » d'échantillons de particules prélevés par aspiration le long d'un ESP « fil-cylindre » pour étudier la distribution de dépôt des particules le long de l'électrode de collection et surtout comprendre le mouvement des particules le long de l'ESP.

Une modélisation par la méthode des plans d'expériences est réalisée afin de valider les hypothèses formulées lors des essais expérimentaux préliminaires [76] [77].

#### **IV.2. Caractéristique (Courant-Tension)**

Avant de commencer n'importe quelle procédure expérimentale, il est intéressant de tracer la caractéristique du courant en fonction de la tension dans les deux polarités, positive et négative. Ceci va nous permettre d'avoir une référence de l'ordre de grandeur du courant en essayant de travailler dans les mêmes conditions d'humidité et de températures d'un côté. D'un autre côté, cette étude va nous permettre de choisir la polarité appropriée pour le filtre électrostatique.

La courbe tracée sur la figure IV-1 représente la variation du courant total en fonction de la tension appliquée pour les polarités positive et négative. Comme observé dans d'autres études, la caractéristique « courant-tension » montre que le courant en polarité

négative est plus élevé en raison de la grande mobilité des électrons dans cette polarité, alors que le courant en polarité positive est causé par le mouvement des ions positifs [78] [79] [80].

Pour cette raison, c'est la polarité négative qui est prise comme tension appliquée dans la suite de notre travail.

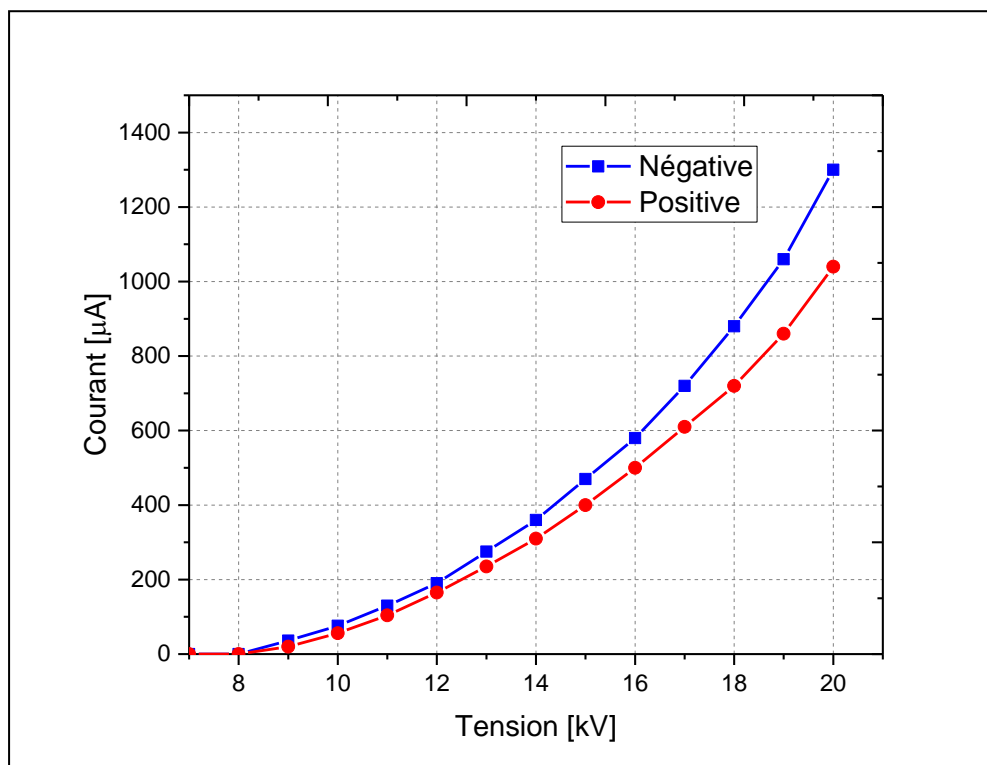


Figure IV.1: Caractéristique « Courant- tension » dans les deux polarités positive et polarité négative.

### IV.3. Courants partiels le long des portions de l'électrode collectrice

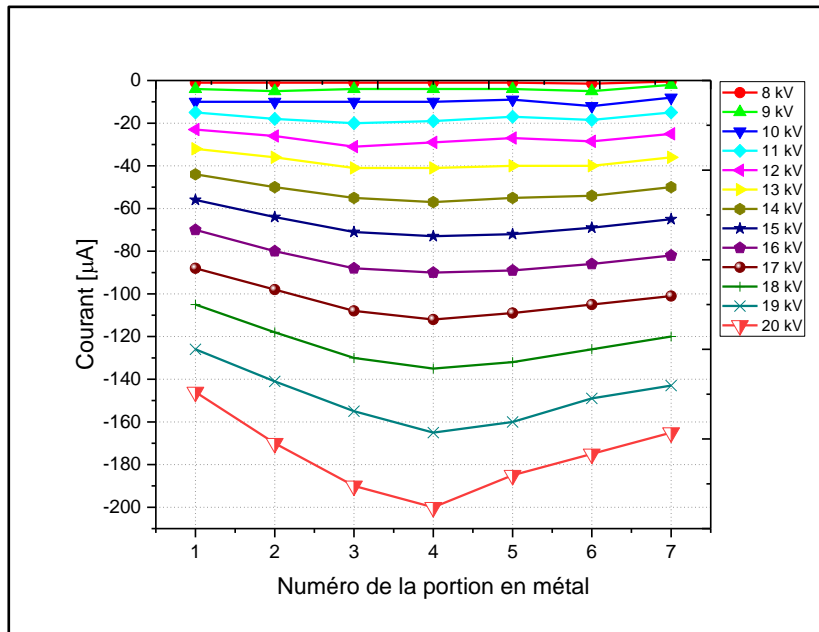
En insérant un milliampèremètre en série de chaque portion métallique de l'électrode collectrice, tout en reliant les autres portions à la terre, on peut établir la distribution des courants partiels le long de l'électrode collectrice.

Le relevé de la distribution du courant le long de l'ESP montre que l'intensité du courant est maximale dans la portion centrale de l'électrode de collection, comme le montrent les figures IV-2 et IV-3.

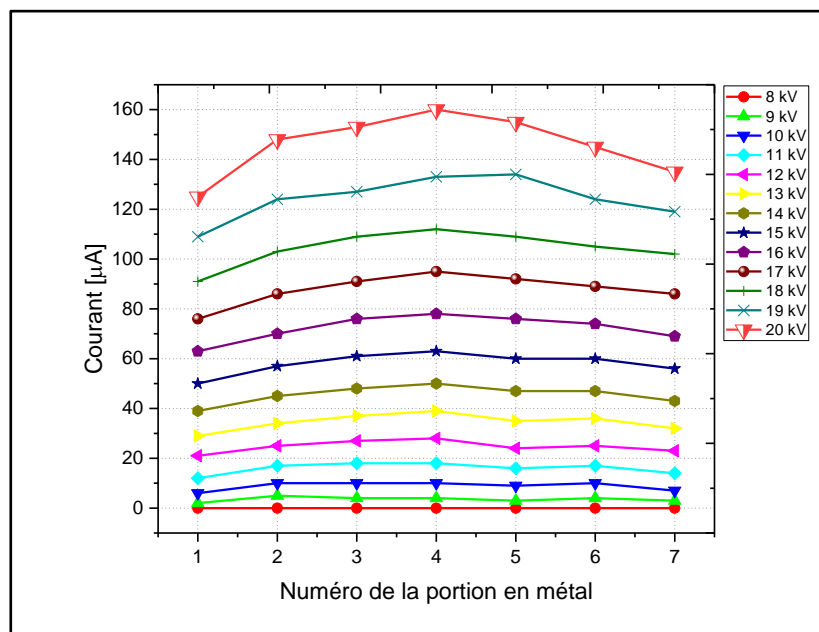
Théoriquement, la distribution de la densité de courant le long d'un précipitateur (s'il est composé de plusieurs compartiments de collecte) est la même partout, cela revient à considérer ces différents compartiments de collecte comme si c'était des circuits montés en parallèles et donc le courant total est la somme des courants partiels.

Expérimentalement, un autre phénomène s'observe (figure IV-2 et figure IV-3). On peut expliquer cette tendance maximale dans la portion centrale des électrodes de collection

par l'accumulation de l'influence des champs des portions latérales sur le champ créé dans le compartiment central. Ainsi, cette influence se manifeste de la même façon sur les deux côtés du précipitateur électrostatique, ce qui donne une valeur supérieure au centre. Il faut noter que cette influence est d'autant plus significative pour des tensions plus grandes [81].



**Figure IV.2 :** Distribution de l'intensité du courant le long de l'électrode de collecte pour différentes valeurs de tension en polarité négative



**Figure IV.3 :** Distribution de l'intensité du courant le long de l'électrode de collecte pour différentes valeurs de tension en polarité positive



#### IV.4. Variation de la charge en fonction de la tension

Les courbes des figures IV.4 à IV.8 représentent la variation de la charge massique des particules pour plusieurs valeurs de la tension continue appliquée. Ces courbes sont tracées pour une seule tension mais pour 3 essais identiques répétitifs afin de vérifier la répétabilité des valeurs expérimentales obtenues. La figure IV.9 récapitule tous ces résultats, elle représente les résultats obtenus avec la valeur moyenne des 3 essais mais pour toutes les valeurs de la tension appliquée. Ces courbes sont tracées afin d'analyser la distribution de la charge le long du précipitateur. On voit bien que la charge acquise par les particules augmente avec l'augmentation de la haute tension appliquée [82] [83].

Pour les petites tensions, la répartition de charge au niveau des sept électrodes est presque uniforme, ceci nous incite à déduire que le dépôt des particules sur les sept électrodes s'effectue d'une façon plus au moins uniforme.

Pour des tensions de grande valeur, les particules sont mieux chargées à l'entrée de l'électrofiltre, vu que la charge acquise par les particules est élevée pour de grandes tensions. Les particules qui sont bien chargées sont captées au niveau des premières portions, celles qui ne sont pas chargées suffisamment pour être captées, vont acquérir progressivement une charge jusqu'à atteindre la charge suffisante au niveau de la portion 4.

Il faut noter que même pour de petites tensions, le rendement reste assez satisfaisant vu que la force du vent électrique est minimale lorsqu'une petite tension est appliquée. Cette propriété peut être considérée comme un avantage qui favorise l'uniformité de la collecte des particules.

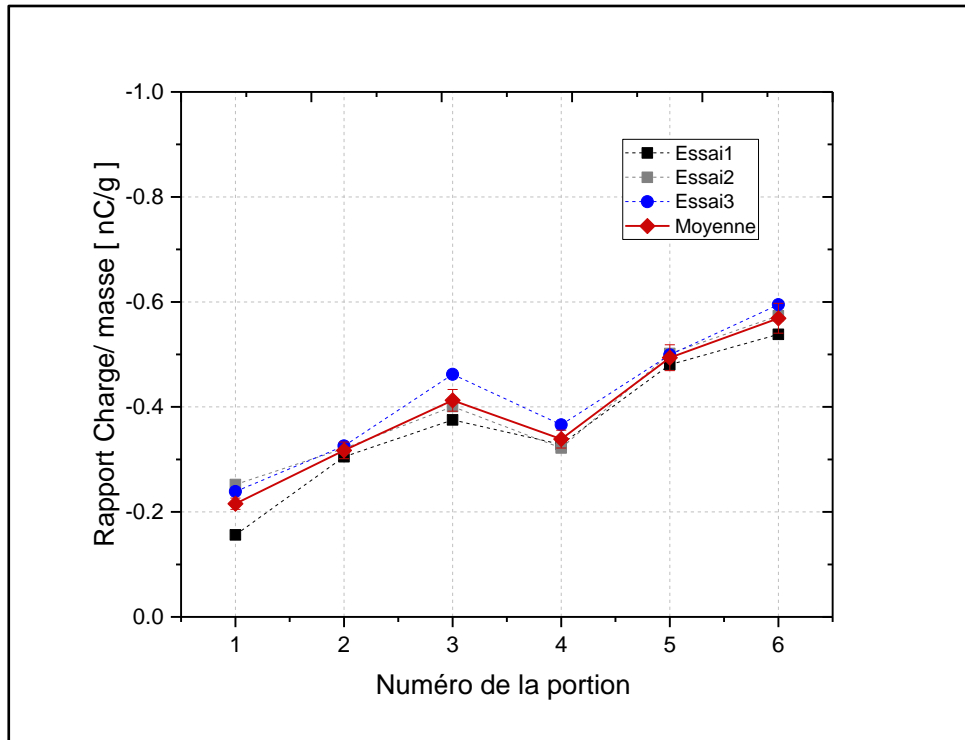


Figure IV.4 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions.  
Tension appliquée 8 kV.

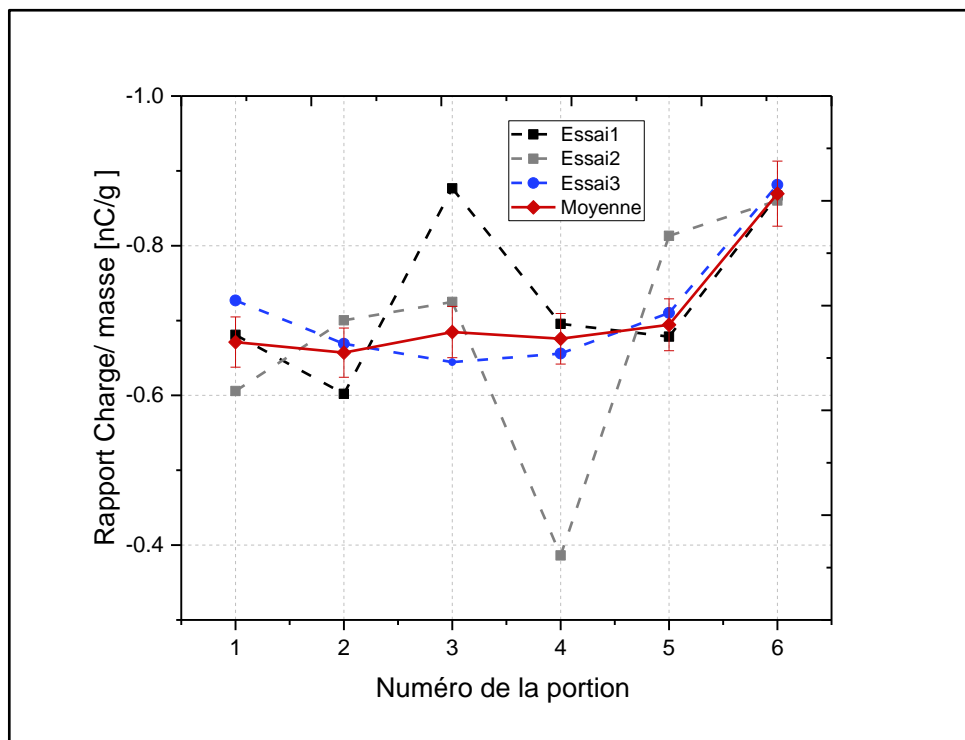


Figure IV.5 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions.  
Tension appliquée 10 kV.

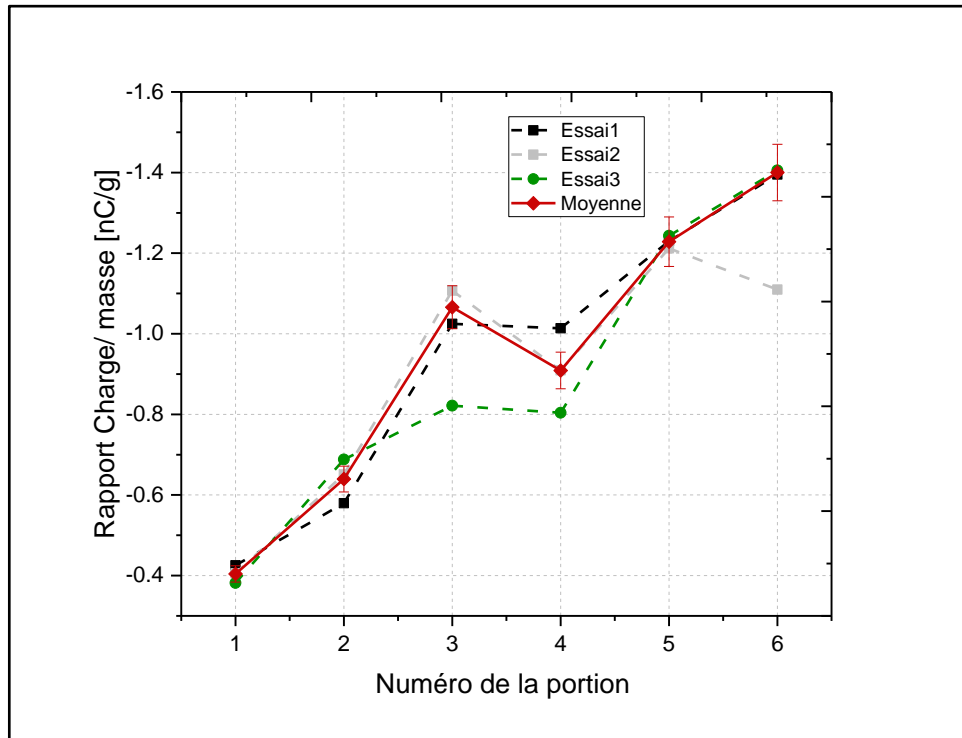


Figure IV.6 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions.

Tension appliquée 12 kV.

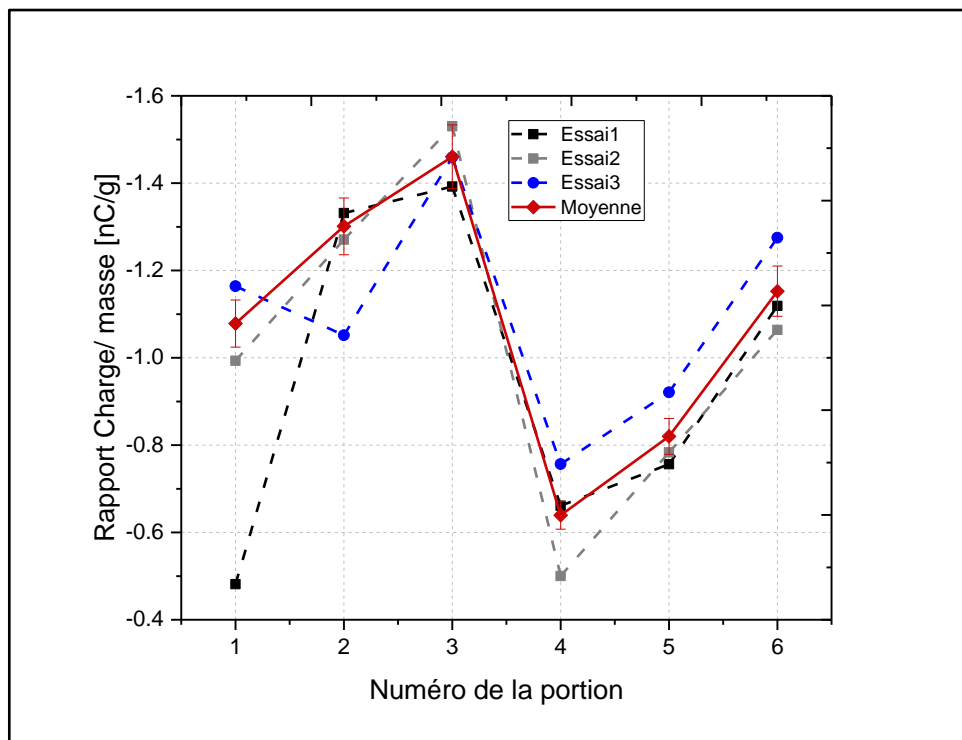
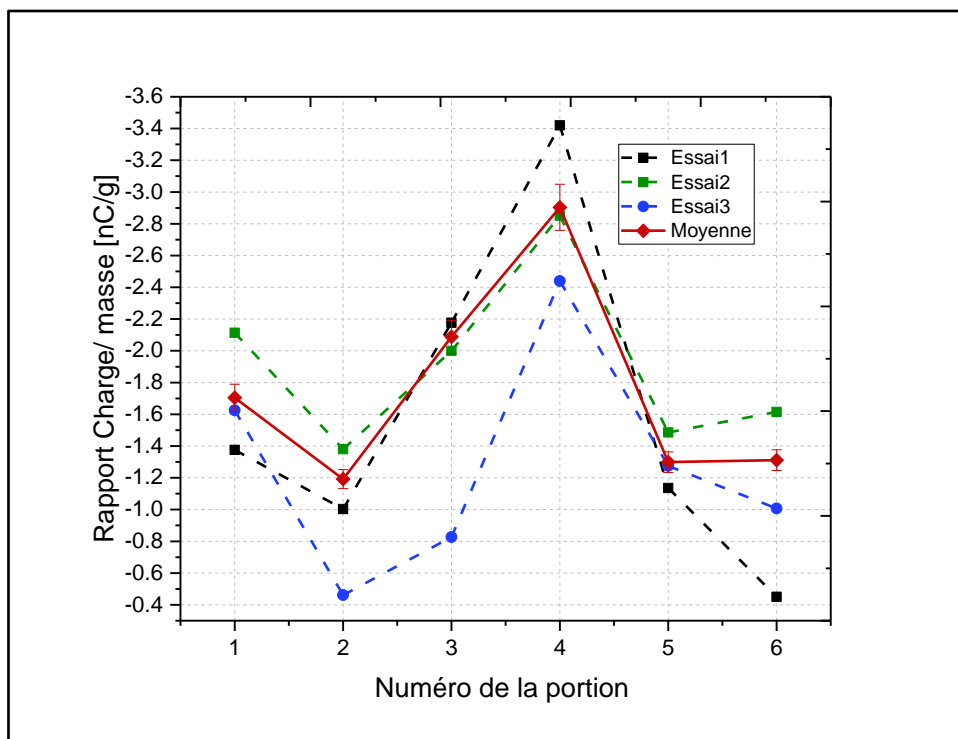


Figure IV.7 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions.

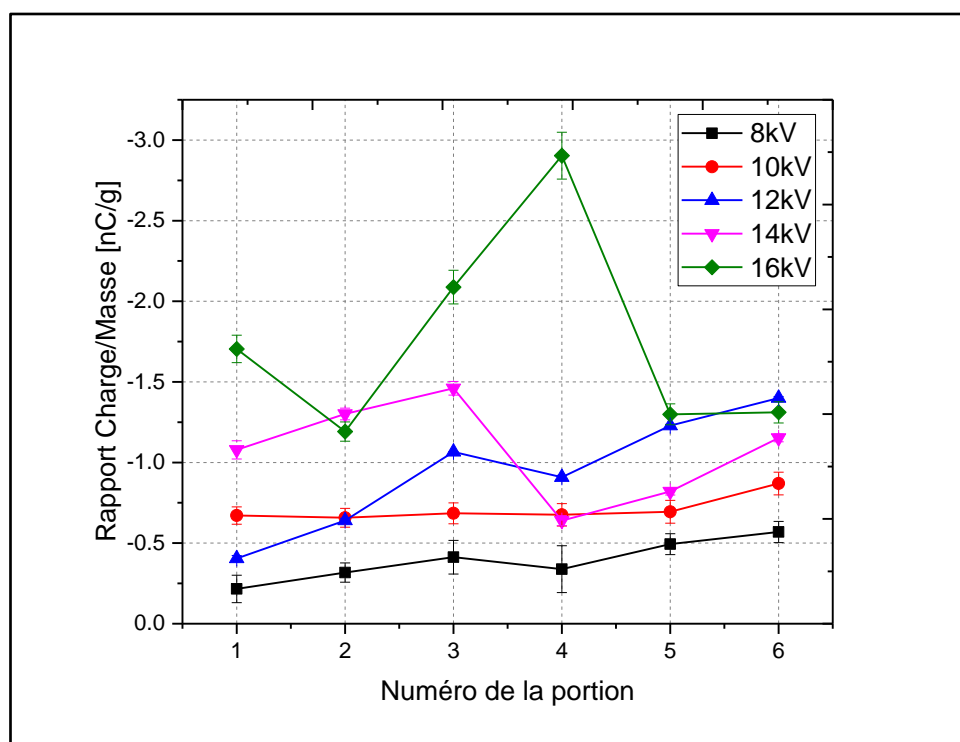
Tension appliquée 14 kV.



**Figure IV.8 :** Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions.  
Tension appliquée 16 kV.

La figure IV.9 montre une diminution brutale de la charge électrique après la portion 3 ou après la portion 4, c'est-à-dire après que les particules atteignent la position centrale de l'électrode. Nous avons déduit que cette diminution était due au fait qu'une quantité importante de particules hautement chargées était collectée dans cette partie centrale du filtre. Les particules faiblement chargées restantes acquièrent une charge au cours de leur progression le long du précipitateur et sont par conséquent collectées aux portions 5 et 6.

C'est pour cette raison, qu'on remarque une valeur maximale de la charge massique au centre puis une diminution de celle-ci vers la sortie de l'électrode. Ceci concorde parfaitement avec l'hypothèse émise dans la section (§IV.2.2), qui stipule que le champ est maximal au centre, vu qu'il y a la sommation de l'influence des champs des portions latérales.



**Figure IV.9 :** Variation de la charge massique des particules en fonction de la haute tension le long de du précipitateur.

#### IV.5. Variation de la charge en fonction du débit d'air

Les courbes tracées dans les figures IV.10 à IV.13 représentent la variation de la charge massique des particules en fonction de la tension continue appliquée. Ces courbes sont tracées afin d'analyser la distribution de la charge le long du précipitateur.

En variant la fréquence du variateur de vitesse, qui contrôle le moteur du cyclone, dans une plage variant de 10 Hz à 16 Hz, la charge acquise par les particules diminue ; ceci concorde parfaitement avec la théorie vu que le temps de séjour de la particule diminue avec l'augmentation de la vitesse de l'air. Ceci est expliqué par la relation de Pauthenier qui stipule que la charge des particules augmente en augmentant le temps de séjour de la particule dans un champ électrique jusqu'à saturation de cette dernière.

Dans les figures VI.10 à VI.12, c'est-à-dire pour les fréquences 10 Hz, 12 Hz et 14 Hz, la condition de Pauthenier est largement satisfaite. Par contre, pour la fréquence de 16 Hz (Figure IV-13), malgré l'augmentation de la fréquence la charge reste assez grande, ceci peut

nous inciter à croire que la tendance de la charge qui diminue avec l'augmentation de la vitesse de l'air n'est pas respectée.

Mais, ce résultat s'explique par le fait que l'augmentation de la vitesse de l'air engendre l'augmentation de l'effet tribo-électrique des particules. Comme la charge corona acquise par les particules est négative (polarité négative) et que les particules utilisées de PVC acquièrent une charge négative grâce à l'effet tribo-électrique, donc la charge résultante dans ce cas représente l'addition des deux charges, ce qui explique la charge plus au moins importante dans cet essai malgré la fréquence élevée.

Il faut préciser, que l'effet tribo-électrique est un mode d'électrisation par frottement entre particules, l'augmentation de la vitesse de l'air crée plus de frottement entre ces dernières, ceci est traduit par l'augmentation de la charge. La courbe de la figure IV-14 représente l'évolution de la charge massique en fonction de la fréquence.

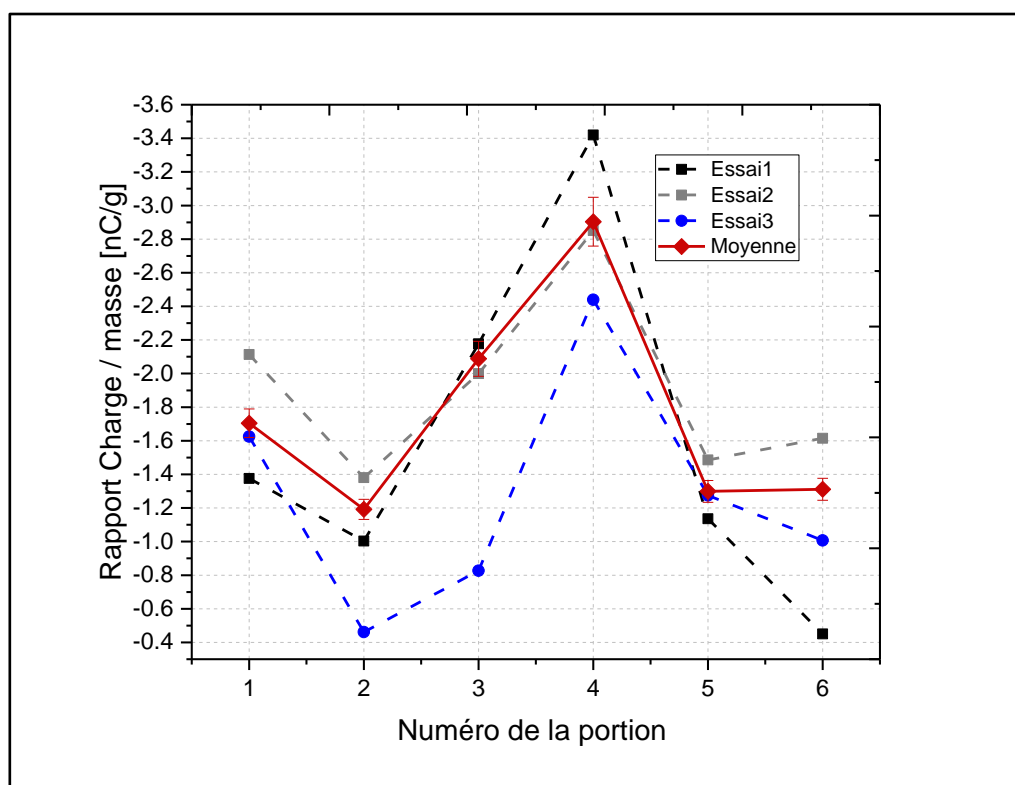


Figure IV.10: Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions.

Fréquence de 10 Hz

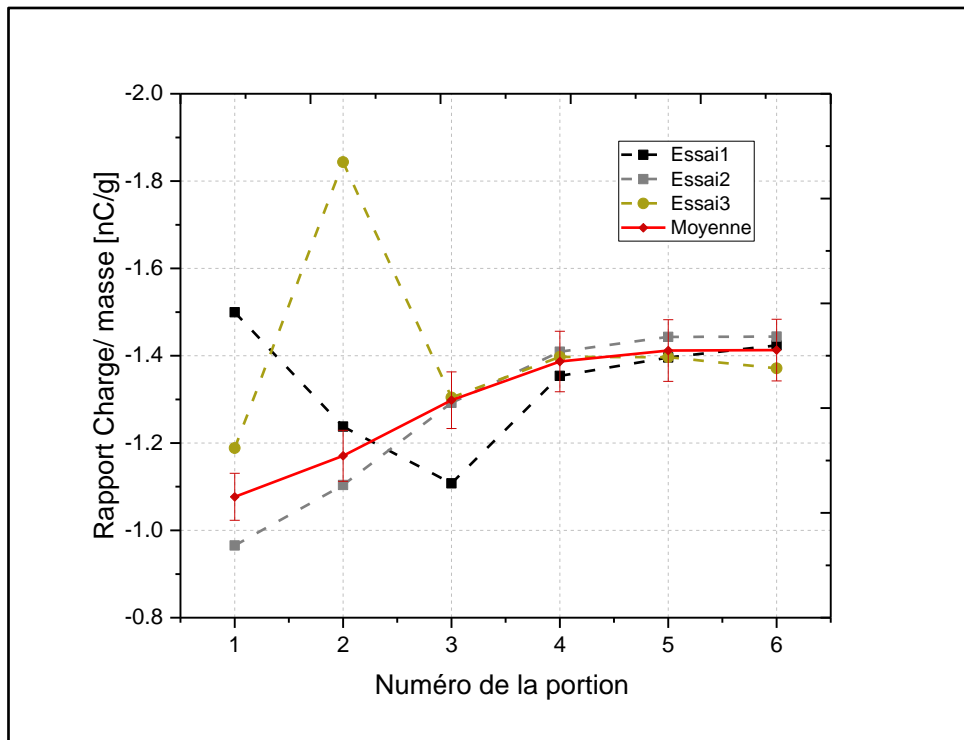


Figure IV.11 : Variation de la charge des particules en fonction de la position des portions  
Fréquence de 12 Hz

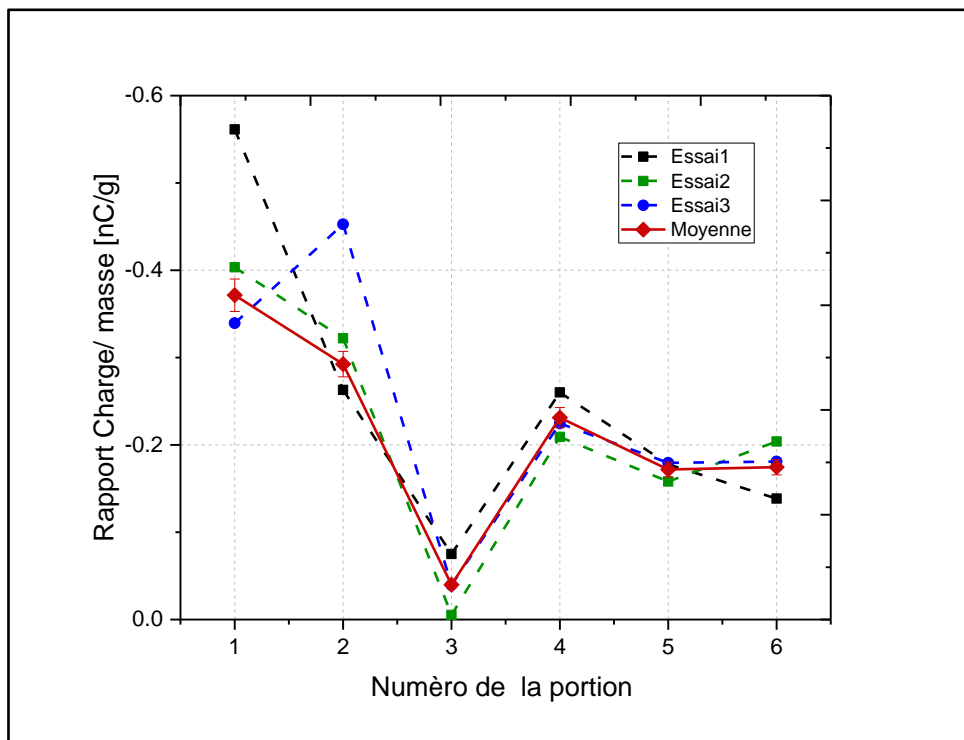
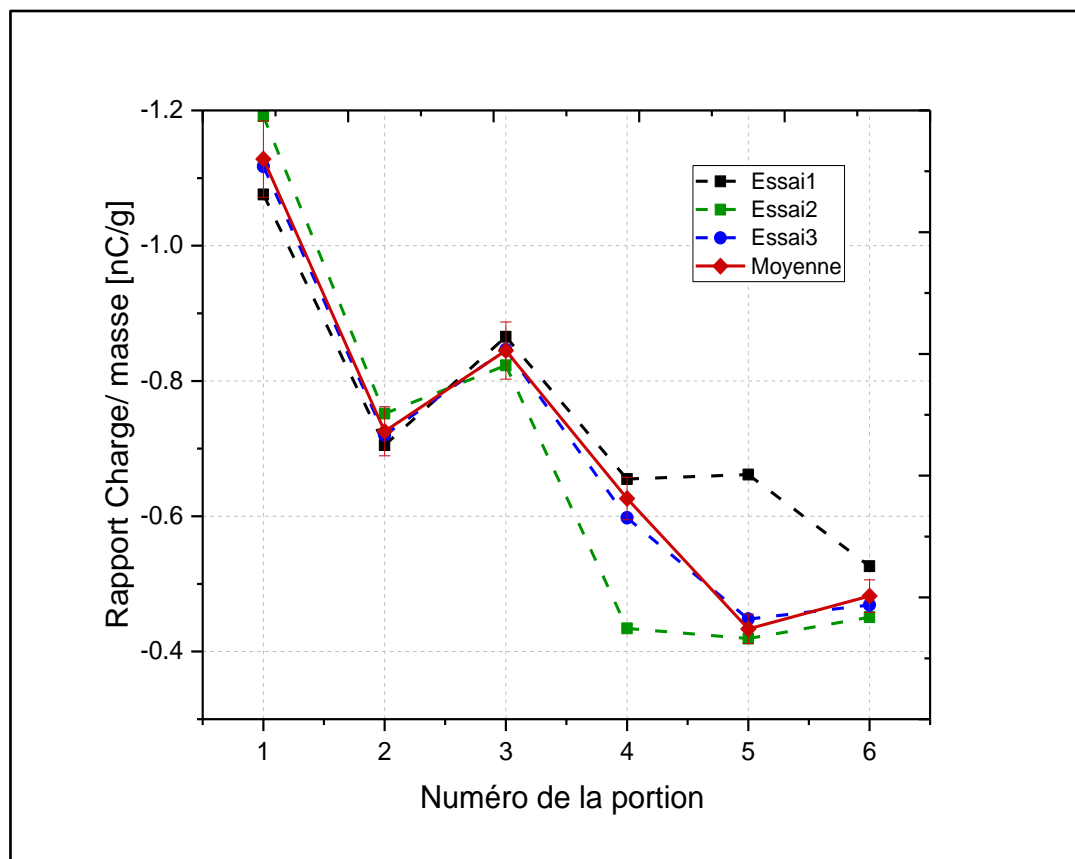


Figure IV.12 : Variation de la charge des particules en fonction de la position des portions.  
Fréquence de 14 Hz



**Figure IV.13 :** Variation de la charge massique des particules en fonction de la position des portions.  
Fréquence de 16 Hz

Comme il est montré à la figure IV.14. La charge électrique est plus élevée pour 16 Hz que pour 14 Hz en raison de l'effet de la charge triboélectrique. Cet effet devient plus important en raison de la force d'impact des particules, qui devient plus forte pour une vitesse d'écoulement élevée de l'air. Lorsque deux types de matériaux sont mis en contact l'un avec l'autre ou, comme dans notre cas, les particules s'écoulent dans l'air, une charge électrique est acquise. Si le nombre d'impact entre particule augmente ou si la vitesse de la particule est grande, la quantité de charge transférée augmente aussi. Ce phénomène de transfert d'électrons - la «triboélectricité» - n'est pas encore totalement expliqué.

De plus, la charge massique atteint son maximum au niveau de l'électrode 4 pour une fréquence de 10 Hz en raison de la charge électrique élevée au centre de l'électrofiltre, ce qui est concordant avec notre interprétation.



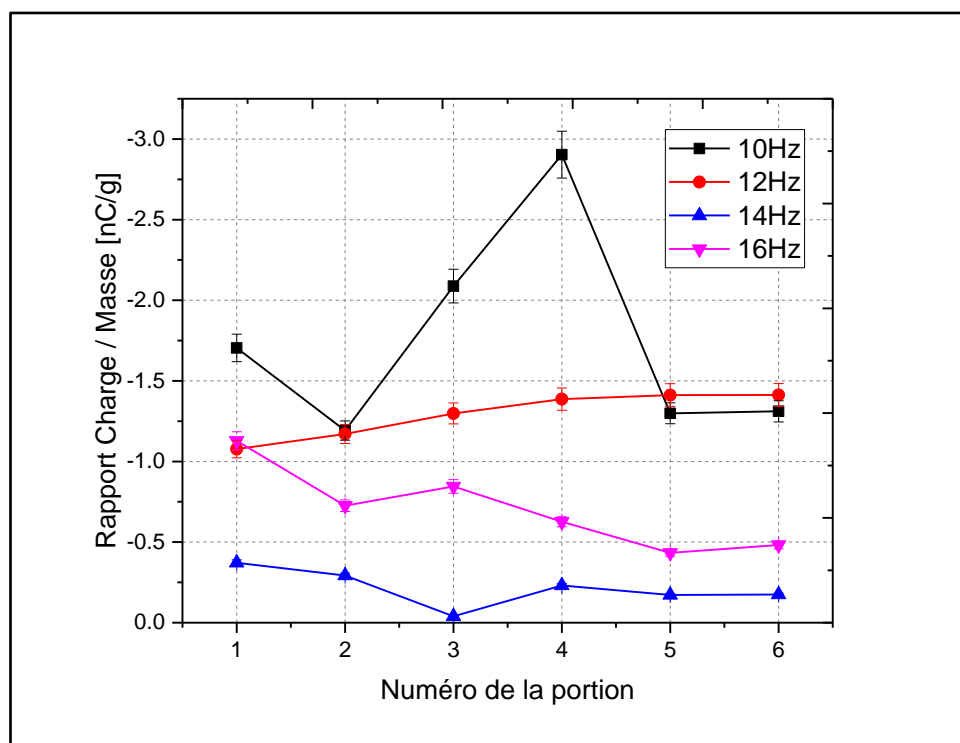


Figure IV.14 : Variation de la charge massique des particules en fonction de la fréquence le long de du précipitateur.

## IV.6. Modélisation du processus par la méthode du plan d'expériences

### IV.6.1. Introduction

Lorsque les connaissances antérieures des expérimentateurs ne permettent pas d'adopter toute l'information recherchée concernant comment réagit le système face au changement des paramètres de réglage, une expérimentation structurée s'impose.

Les scientifiques sont souvent amenés à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et essaye ensuite d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs.

### IV.6.2. Plans composites à faces centrées

Les plans composite à faces centrées font partie des plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses. Dans ce contexte, il s'agit sûrement des dispositifs expérimentaux les plus répandues. Leur usage est particulièrement destiné aux problèmes d'optimisation, quand la stratégie expérimentale conduit à construire et interpréter un modèle empirique, pour la recherche d'une solution dans le domaine expérimentale. Les plans composites centrés

apparaissent historiquement parmi les premiers plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponse. Quand cela est possible, ils autorisent une démarche séquentielle, qui vise à compléter un premier plan factoriel complet de type  $2^k$ , ou encore un plan factoriels fractionnaire de type  $2^{k-r}$  dans lesquels les  $k$  facteurs sont représentés par des variables quantitatives continues.

La construction des plans composites centrés nécessite la définition préalable de différents indicateurs algébriques pour traduire la qualité du dispositif expérimental. Donc, la notion de pseudo orthogonalité, la notion d'isovariance par rotation ou encore la notion de précision uniforme est introduite. Le choix d'un critère conditionne la définition des traitements du plan d'expériences, également appelé essais.

Le modèle d'exploration du domaine expérimental est généralement un modèle polynomial du second degré. L'estimation des coefficients des différents monômes fait appel à la méthode des moindres carrés (PLS) et l'interprétation de l'équation du modèle renvoie à une méthode bien connue, couramment appelée analyse canonique des quadriques [76] [77].

#### **IV.6.3. Elaboration de la méthode**

La technique des plans d'expérience peut être définie comme une méthode pour choisir le nombre approprié d'expériences qui permet de n'effectuer que le strict minimum d'essais et les conditions de les accomplir. Ainsi, ce procédé permet la minimisation du nombre d'essais total effectués afin d'atteindre un objectif bien défini.

Dans le cas de la séparation électrostatique, l'objectif était d'augmenter l'efficacité du processus c'est à dire la pureté et la récupération des produits à séparer et minimiser le plus possible la quantité du mixte collectée dans le compartiment qui lui est réservé. La détermination du réglage optimal d'un procédé quelconque avec des efforts minimums dépend de la façon dont les intervalles des facteurs d'entrée sont choisis. Cette méthode peut être hiérarchisée comme suit:

- Choix des facteurs les plus intéressants et les plus aptes à être considérés comme influents.
- Choix de l'intervalle de variation de chaque facteur, y compris les valeurs maximales, minimales et centrales.
- Choix aléatoire d'un certain nombre d'états et élaboration d'une matrice d'expériences avec tous les états possibles et réponses correspondantes.

Avant d'entamer les essais, il faut prendre un temps de réflexion pour le choix du genre de plan approprié qui puisse modéliser le processus avec le plus de précision possible. Dans le travail actuel on s'est intéressé aux plans composites à faces centrées qui utilisent la modélisation par surface de réponse (RSM). Cette technique assure une dépendance quadratique entre la fonction de sortie à optimiser et les facteurs d'entrées indépendants  $x_i$  ( $i = 1, \dots, k$ ) par la relation de régression du deuxième ordre suivante [76]:

$$\hat{y} = f(x_i^*) = \hat{a}_0 + \sum \hat{a}_i x_i^* + \sum \hat{a}_{ij} x_i^* x_j^* + \sum \hat{a}_{ii} x_i^{*2} \quad (\text{IV.1})$$

Sachant que  $\Delta x_i$  et  $x_{i0}$  sont respectivement le pas de variation et la valeur centrale du facteur  $i$ , les valeurs normalisées centrées sont définies par la relation (IV.2):

$$x_i^* = (x_i - x_{i0}) / \Delta x_i \quad (\text{IV.2})$$

Les variables  $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  sont des coefficients de régression estimés par la méthode des moindres carrés de telle façon à avoir une variance minimale entre le modèle prédictif et les valeurs de sortie expérimentales.

#### IV.6.4. Représentation du domaine d'étude expérimental

Les plans composites à faces centrées se prêtent bien au déroulement séquentiel d'une étude. Ils sont composés de [77] :

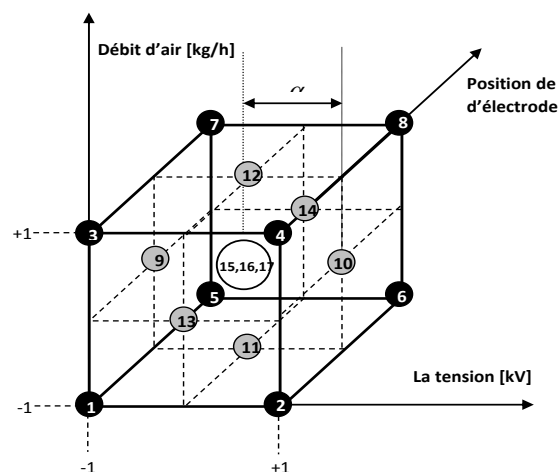


Figure IV.15 : Représentation géométrique du domaine d'étude du plan d'expériences.

- Un plan comportant les essais fondamentaux du plan factoriel complet augmentés d'un certain nombre d'essais au centre. C'est la première phase de l'étude.
- Un deuxième plan appelé (plan étoilé) augmentés aussi de certains essais au centre du domaine. C'est la seconde phase de l'étude, elle n'est entreprise que si le modèle du

premier degré n'est pas valide. Les points du plan en étoile sont situés à la distance  $\alpha$  du centre du domaine d'étude, comme montré dans la figure IV.15.

#### IV.6.5. Résultats expérimentaux des plans d'expériences :

Parmi les divers facteurs qui influencent le procédé de la précipitation électrostatique, les trois suivants ont été choisis comme facteurs d'entrée pour les essais du plan d'expériences composites à faces centrées :

- Haute tension continue appliquée  $U$  [kV];
- Débit de l'écoulement du fluide  $D$  [kg/h];
- Position de l'une des portions collectrices le long de tout le tube collecteur.

Le tableau IV.1 regroupe les résultats du plan élaboré :

**Tableau IV.1** : Résultats expérimentaux du plan composites à faces centrées

N de l'essai	Tension $U$ [kV]	Débit $D$ [kg/h]	Numéro de la portion $N$	Charge massique [nC/g]	Rendement [%]
1	10	2,6	1	1,470	94,94
2	16	2,6	1	2,232	99,00
3	10	3,6	1	1,665	80,32
4	16	3,6	1	1,676	90,16
5	10	2,6	6	1,376	95,44
6	16	2,6	6	2,178	98,80
7	10	3,6	6	1,523	80,22
8	16	3,6	6	1,558	89,34
9	10	3,1	3,5	1,671	88,86
10	16	3,1	3,5	2,070	95,97
11	13	2,6	3,5	1,883	99,00
12	13	3,6	3,5	1,671	88,38
13	13	3,1	1	1,789	96,11
14	13	3,1	6	1,691	95,95
15	13	3,1	3,5	1,952	95,00
16	13	3,1	3,5	1,872	95,61
17	13	3,1	3,5	1,904	93,00

### IV.6.6. Modèles mathématiques

Les modèles mathématiques obtenus pour la charge massique et le rendement de filtration sont exposés ci-dessous.

#### IV.6.6.1. Charge massique

Le modèle de la charge massique établi par la méthode des plans d'expérience est représenté par l'équation suivante :

$$Q_m = 1,877 + 0,201U - 0,105D - 0,051N + 0,017U^2 - 0,077D^2 - 0,114N^2 - 0,189UD + 0,008UN - 0,014DN \quad (IV.3)$$

Les tests statistiques montrent que le modèle établi pour la charge massique reflète bien les résultats expérimentaux, puisqu'on a obtenu des critères ( $R^2 = 0,989$  et  $Q^2 = 0,967$ ) proches de l'unité, qui sont des paramètres qui évaluent la qualité de l'ajustement du modèle postulé ainsi que sa validité.

Ce modèle peut être exploité en toute confiance pour faire des prévisions dans le domaine d'étude choisi et donc l'employer pour l'interprétation des résultats et comprendre le phénomène de distribution de la charge le long du précipitateur.

#### a) Influence et effets des facteurs choisis

En utilisant le logiciel MODDE 5.0, on peut tracer l'histogramme de la figure IV.16 qui montre l'influence de chaque facteur sur la sortie considérée, qui est la charge massique.

Ce graphe montre que la haute tension continue et le débit d'écoulement ont un grand effet sur la réponse de ce processus. On voit bien que la charge massique augmente avec la tension continue et diminue avec l'augmentation du débit d'éboulement. Les coefficients qui représentent cette influence sont: (+0,201) pour la haute tension et (-0,105) pour le débit d'air. La position de la portion métallique tout au long du précipitateur a une influence moins importante par rapport aux deux autres. Il ne faut pas oublier de prendre en considération l'effet de la forte interaction qui existe entre la tension et le débit, ceci est traduit par un coefficient de (-0.189).

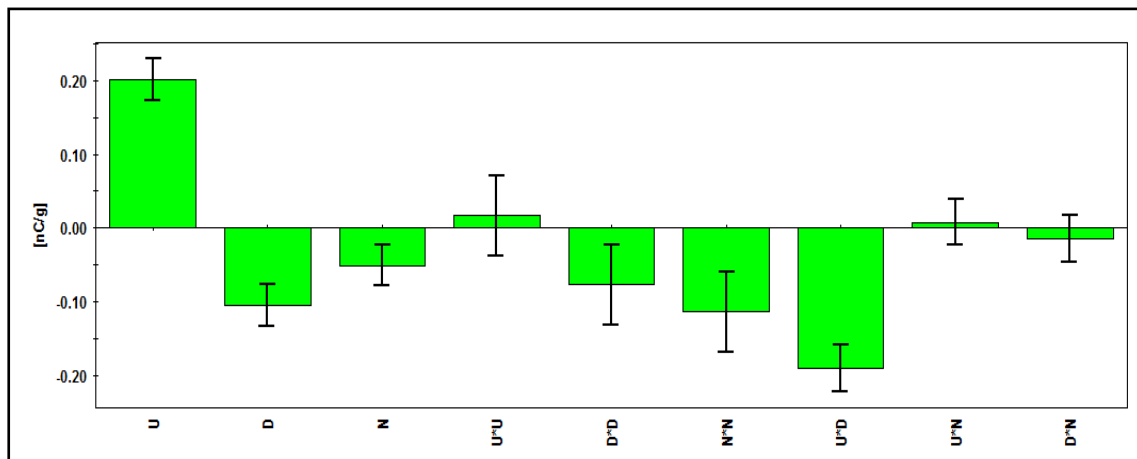


Figure IV.16 : Coefficients des facteurs et des interactions sur la charge massique.

### b) Courbes de prédiction centralisées

Les courbes représentées dans la figure IV.17 sont tracées à partir du modèle de prédiction établi précédemment, autour de la valeur centrale. À partir de ces courbes de prédiction centralisées, on constate que :

- La tension est un facteur influent sur la sortie considérée, l'augmentation de la tension dans cet intervalle entraîne l'augmentation de la charge massique.
- Le débit d'écoulement est aussi un paramètre influent pour la charge massique, son augmentation entraîne la diminution de cette dernière.
- La charge massique augmente jusqu'à atteindre une valeur crête au centre de la longueur de l'électrode de collecte, puis diminue en allant vers la fin de l'électrode.

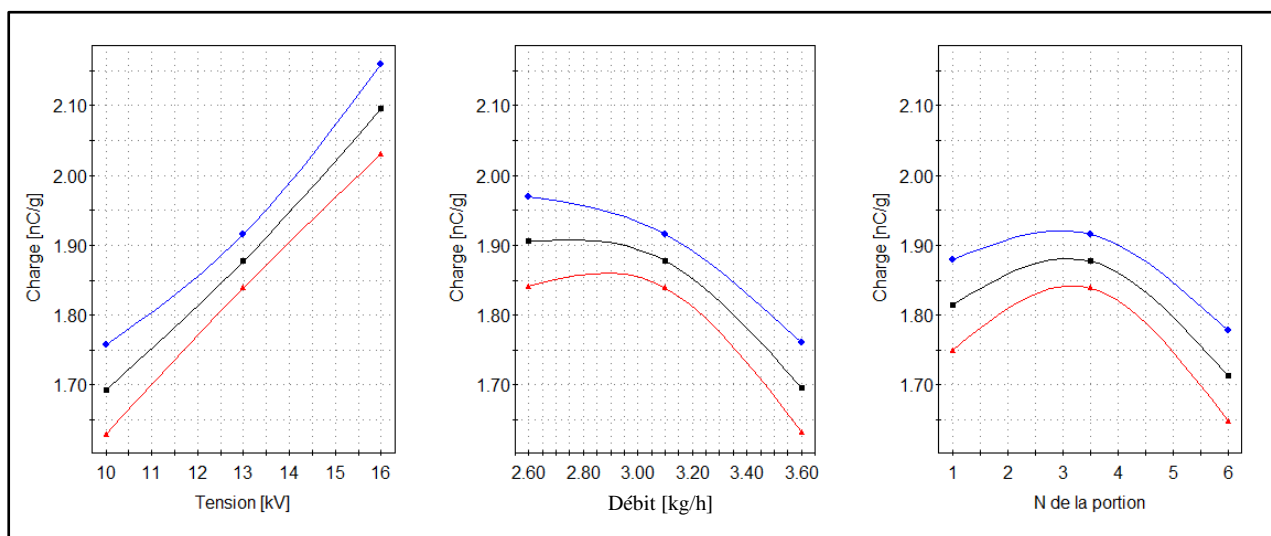


Figure IV.17 : Courbes de prédiction centralisées de la charge massique.

### c) Courbes d'iso-réponses

Les courbes d'iso-réponses Figure IV.18, représentent la charge massique des particules considérée comme sortie pour le plan d'expériences. On s'est intéressé à tracer ces courbes afin d'analyser l'influence des trois paramètres (tension, débit d'écoulement et position d'électrode de collecte) sur cette sortie.

En se référant à la figure IV.18 qui met en évidence l'influence de la tension continue sur la charge massique, on constate l'effet prédominant de ce facteur par rapport aux autres. Ceci se ressent en comparant le réglage à une tension de 10 kV et le réglage à la tension de 16 kV. Dans le premier cas, on trouve que quelles que soient les valeurs du débit d'écoulement d'air ou de la position de l'électrode de collecte, la charge massique ne dépasse pas 1,706 nC/g, Par contre dans le deuxième cas, c'est-à-dire pour 16 kV, cette dernière peut atteindre 2,51 nC/g. L'explication est évidente vu que la charge des particules est étroitement liée à la haute tension qui crée l'effet corona et donc un bombardement ionique qui charge ces particules de façon plus efficace.

En ce qui concerne la figure IV.19, les surfaces iso-réponses de la charge massique variant en fonction du débit d'écoulement, c'est le contraire qui se produit : l'augmentation du débit entraîne la diminution de la valeur de la charge électrique. Ceci est lié à la durée de séjour de la particule qui diminue en augmentant la vitesse d'écoulement, ce qui rend le chargement de la particule difficile car elle n'aura pas le temps suffisant pour acquérir une charge suffisante. En termes de valeurs numériques, on trouve une charge massique de 1,685 nC/g pour un débit de 3,6 kg/h contre 2,231 nC/g pour un débit de 2,6 kg/h.

La figure IV.20 représente la distribution de la charge massique le long du précipitateur est d'une grande importance pour analyser la répartition de la charge. Ce résultat se résume dans le fait d'avoir une valeur crête de la charge massique élevée au centre de l'électrode de collection à cause de l'effet de l'augmentation du champ électrique dans cette partie centrale. Nous remarquons le même effet sur les figures IV.18 et IV.19.

On s'est intéressé ensuite à entreprendre cette modélisation par la méthode des plans d'expériences afin d'analyser l'hypothèse formulée précédemment et qui a été largement satisfaite par cette modélisation.

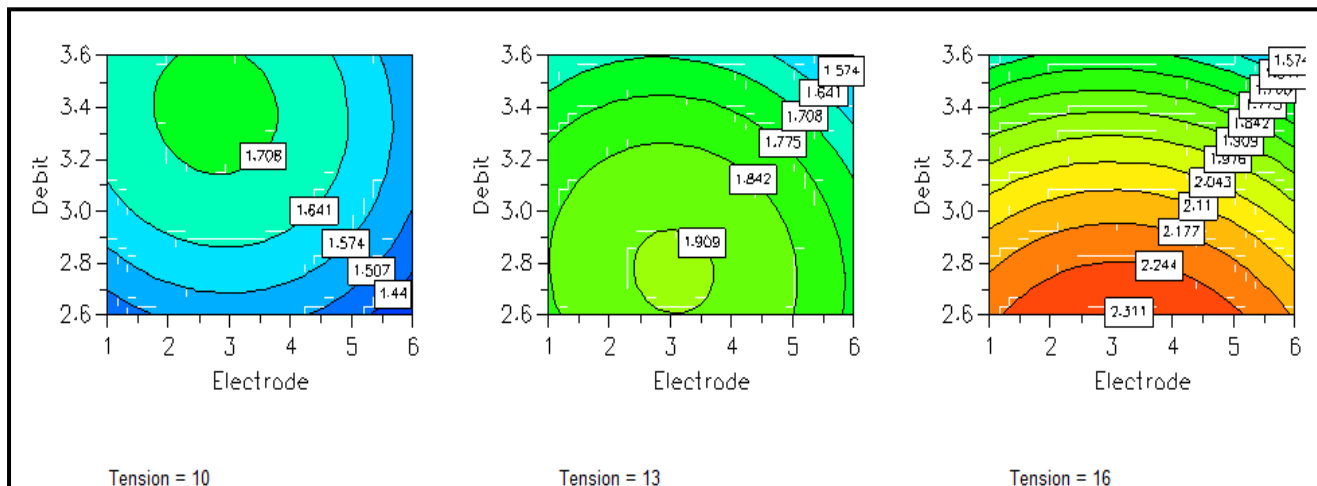


Figure IV.18 : Modélisation par surfaces de réponse de la sortie charge massique  
Paramètre : Tension [kV]

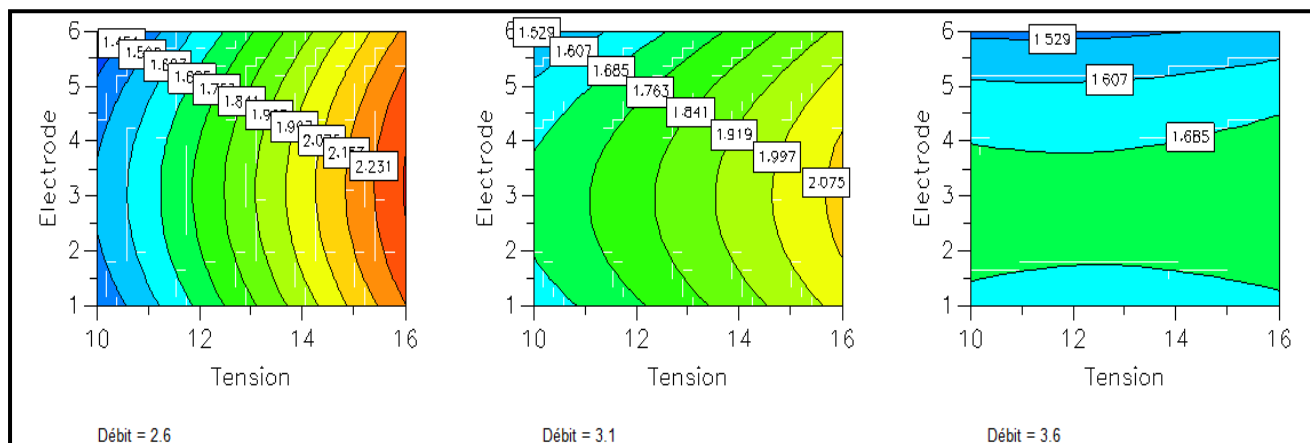


Figure IV.19: Modélisation par surfaces de réponse de la sortie charge massique  
Paramètre : Débit d'écoulement [kg/h]

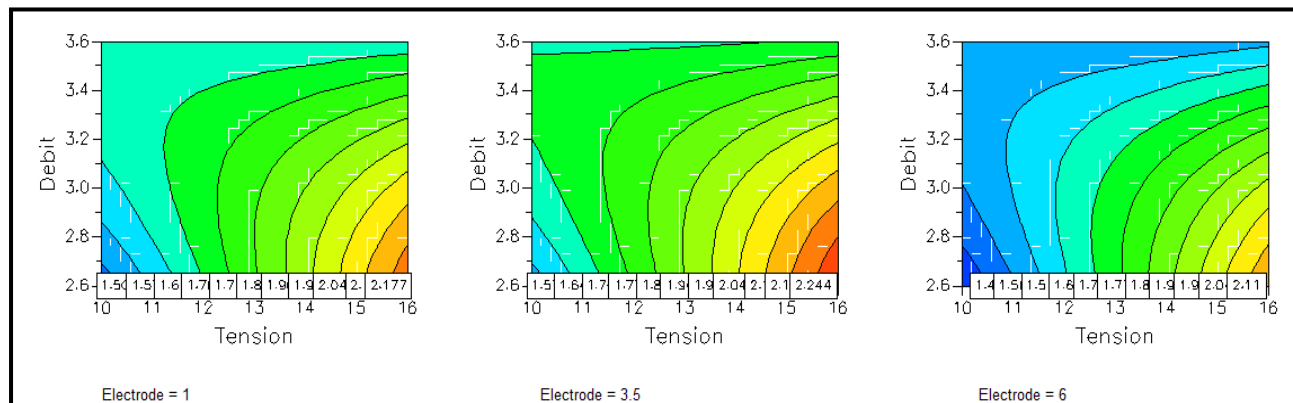


Figure IV.20: Modélisation par surfaces de réponse de la sortie charge massique  
Paramètre : Electrode de collecte.



### IV.6.6.2. Rendement du précipitateur

La modèle mathématique du rendement du précipitateur électrostatique établi par la méthode des plans d'expérience est représenté par l'équation suivante :

$$\eta = 94,98 + 3,35U - 5,87 D - 0,08 N - 2,92 U^2 - 1,65 D^2 + 0,69 N^2 + 1,44 U * D - 0,18 U * N - 0,15 D * N \quad (IV.4)$$

Le test statistique de Fisher valide ce modèle et stipule que le modèle établi pour le rendement total du filtre reflète bien les résultats expérimentaux, puisqu'on a obtenu des valeurs des critères ( $R^2 = 0,989$  et  $Q^2 = 0,966$ ) proches de l'unité. Ce modèle peut être exploité en toute confiance pour faire des prévisions dans le domaine d'étude choisi et donc l'employer pour l'interprétation des résultats.

#### a) Courbes de prédiction centralisées

Les courbes représentées dans la figure IV.21 sont tracées à partir du modèle de prédiction établi précédemment, autour de la valeur centrale.

A partir de ces courbes de prédiction centralisées, on constate que :

- La tension est un facteur influent sur la sortie considérée, l'augmentation de la tension dans entraîne l'augmentation du rendement total du précipitateur.
- Le débit d'écoulement est aussi un paramètre influent pour cette sortie, son augmentation entraîne la diminution des performances des filtres.
- La position de l'électrode n'a aucune influence sur le rendement total du filtre, son effet est négligeable.

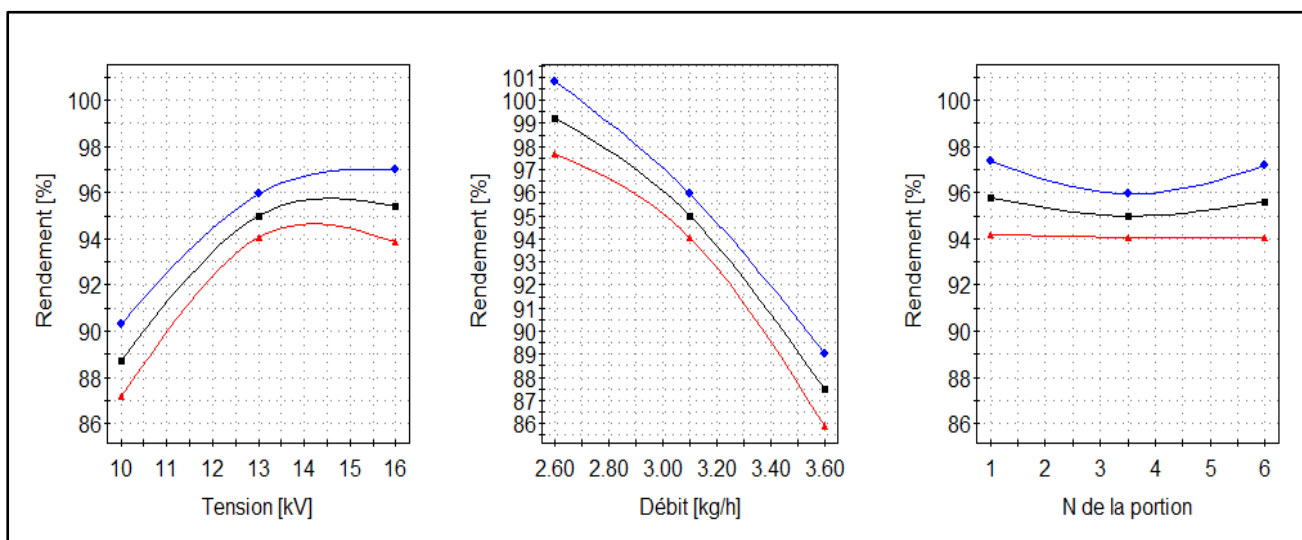


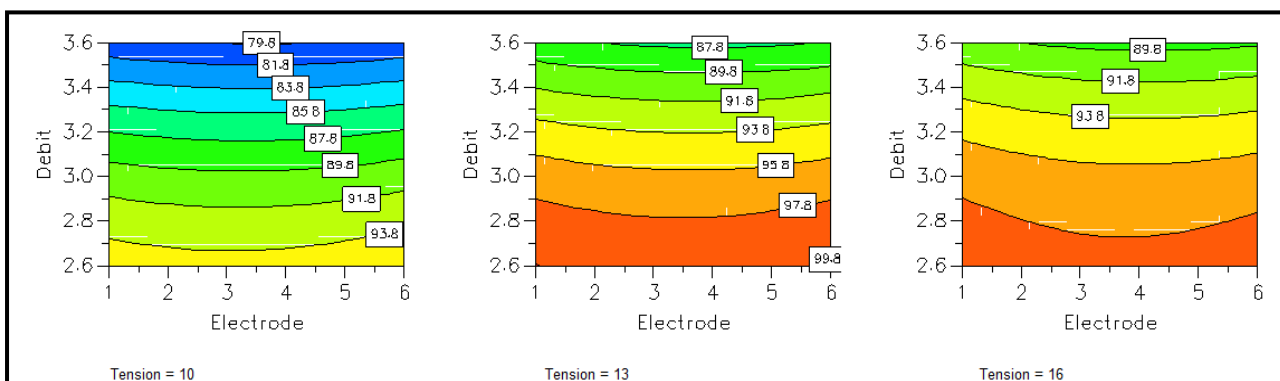
Figure IV.21 : Courbes de prédiction centralisées du rendement total du filtre.

**b) Courbes d'iso-réponses**

On trace les courbes de surface de réponse pour analyser le comportement de la sortie considérée qui est le rendement total du filtre en fonction de différents facteurs à savoir : la tension, le débit et la position d'électrode de collecte.

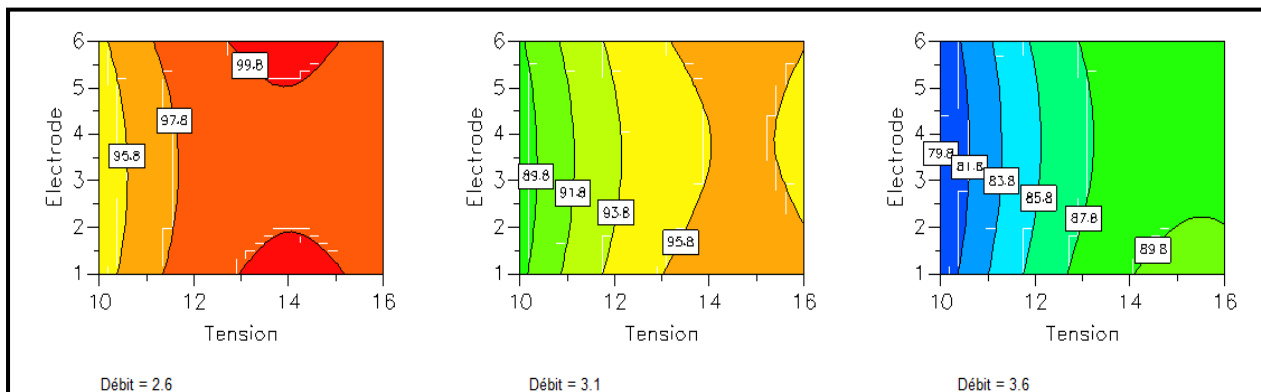
En se référant aux trois figures ci-dessous qui mettent en évidence l'influence de la tension continue (figure IV.22), du débit d'écoulement (figure IV.23) et de la position de l'électrode de collecte (figure IV.24) sur le rendement total de l'électrofiltre, on constate que les deux paramètres les plus influents sont la tension et le débit d'écoulement. Les explications sont similaires à celles présentées pour le modèle de la charge massique, vu qu'il s'agit des mêmes phénomènes.

La différence réside dans le troisième facteur qui est la position d'électrode de collecte. On remarque dans les trois figures que l'efficacité du rendement totale reste la même tout au long de l'électrode de collecte car le rendement ne dépend pas de la position de la portion.



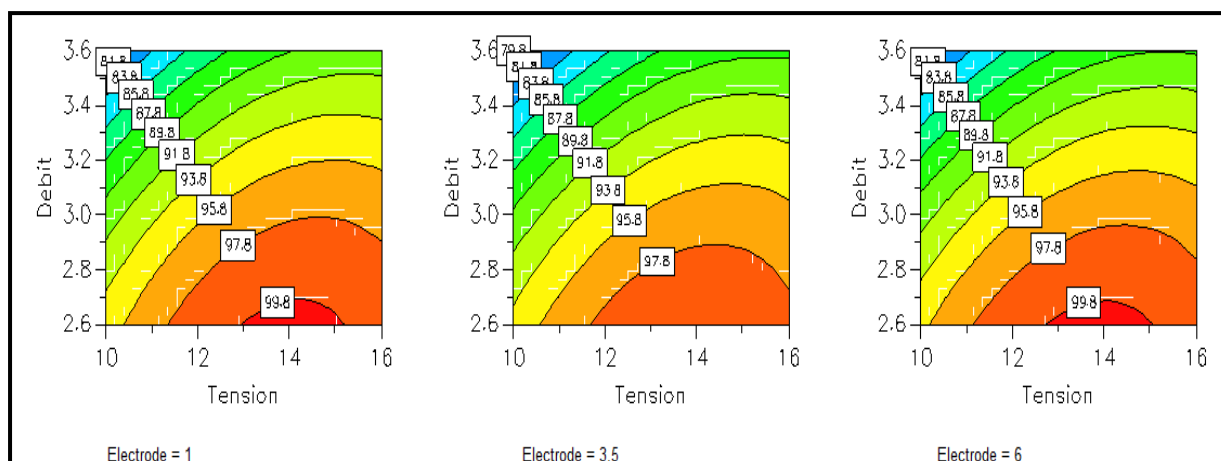
**Figure IV.22:** Modélisation par surfaces de réponse du rendement total du précipitateur

Paramètre: Tension [kV]



**Figure IV.23:** Modélisation par surfaces de réponse du rendement total du précipitateur

Paramètre : Débit [kg/h]



**Figure IV.24:** Modélisation par surfaces de réponse du rendement total du précipitateur

Paramètre : Electrode

#### IV.7. Conclusion

Cette étude a permis de déterminer la distribution du rapport « charge/masse » des particules chargées par effet corona le long d'un précipitateur électrostatique. Ces particules sont absorbées par aspiration à partir de plusieurs ouvertures situées dans l'électrode de collection. Les résultats ont permis d'analyser le mouvement des particules dans l'ESP. Pour des valeurs de tension modérée, le rapport constant le long de l'ESP suggère que le produit est collecté uniformément lorsque les particules acquièrent une charge électrique suffisante au cours de leur progression. Inversement, pour des tensions plus élevées, un dépôt massif se produit à l'entrée dès que les particules sont suffisamment chargées.

Il ressort de la modélisation de ce précipitateur par la méthode des plans d'expérience, deux points importants, à savoir :

- Existence d'une influence des champs partiels des parties latérales de l'électrode de collection sur la valeur au centre de l'électrode, ce qui s'explique par un pic de charge des particules au centre de l'ESP.
- Forte corrélation existant entre la tension et le débit : il est alors recommandé de bien choisir le réglage approprié.

## **Conclusion Générale**

## *Conclusion générale*

La pollution de l'air devient inquiétante dans ce monde de plus en plus industrialisé, les normes internationales en vigueur pour stopper cette pollution sont devenues très strictes et très exigeantes. Pour cette raison, la recherche scientifique n'a cessé de s'orienter pour guider le domaine d'épuration de l'air.

L'objectif du présent travail étant d'apporter une contribution à la compréhension des phénomènes physiques de mise en mouvement et de capture des fines particules en suspension de tailles micronique ou submicronique, dans les électrofiltres de type industriel.

On a divisé notre travail en quatre chapitres dans lesquels on a essayé de répondre aux problématiques qui peuvent réduire l'efficacité de collecte des électrofiltres.

Une synthèse bibliographique a été présentée afin d'apporter une contribution à la compréhension des différents phénomènes qui régissent le fonctionnement des précipitateurs électrostatiques. On s'est intéressé dans un premier temps à poser la problématique qui est la pollution atmosphérique. On a évoqué les sources de sa formation, les caractéristiques et les tailles de la pollution particulaire dans l'air et surtout ses conséquences sur l'environnement et la santé humaine.

On a passé en revue l'ensemble des techniques les plus efficaces pour vaincre cette pollution en établissant une synthèse détaillée sur les précipitateurs électrostatiques. Ensuite, les concepts fondamentaux de la précipitation électrostatique ont été décrits ; on s'est particulièrement intéressé aux mécanismes de charge des particules en suspension, leur vitesse de migration ainsi que les différents modèles de fonctionnement des électrofiltres.

La procédure expérimentale comprend deux grandes parties. Une première partie dans laquelle on a présenté le précipitateur qu'on a réalisé au sein du laboratoire APELEC à Sidi-Bel-Abbès, qui présente l'avantage de pouvoir analyser la distribution de la charge des particules le long du précipitateur. La deuxième partie est consacrée au travail expérimental effectué au laboratoire CNRS de Grenoble, qui concerne plus particulièrement l'épuration des particules de tailles submicroniques. Un intérêt particulier a été porté aux particules microniques et submicroniques utilisées lors des différentes expériences comme matière polluante, en présentant les caractéristiques de chaque échantillon.

Les résultats expérimentaux trouvés ont révélé l'existence d'un phénomène très important, qui stipule, qu'en présence d'un champ électrique intense il y a éclatement des agglomérats qui se sont formés à partir de très fines particules dans les différentes fumées de cigarettes. Une autre étude a également été réalisée avec des particules de natures différentes, comme la fumée d'encens, les particules de calcite et les fines particules de cendres extraites d'un filtre électrostatique d'une centrale thermique de charbon. Dans tous ces cas, il est montré qu'il existe un processus de désintégration qui semble être très général et de ce fait il constitue un facteur primordial affectant l'efficacité de collecte des fines particules. Ces résultats mettent en évidence deux points essentiels :

-L'influence de la turbulence sur l'efficacité de collecte de très fines particules submicroniques de taille inférieure à  $1 \mu\text{m}$  et surtout la gamme inférieure à  $0,6 \mu\text{m}$ ;

-L'existence d'un phénomène d'éclatement, sous l'effet de charges similaires, des agrégats qui se constituent par agglomération de très fines particules dans les différentes fumées et la généralisation de ce phénomène de brisure des agglomérats pour différentes poudres.

L'étude entamée au dernier chapitre a permis de déterminer la distribution du rapport « charge/masse » des particules chargées par effet corona le long d'un précipitateur électrostatique. Ces particules sont absorbées par aspiration à partir d'ouvertures situées dans l'électrode de collecte. Les résultats ont permis d'analyser le mouvement des particules dans l'ESP. Pour des valeurs de tension modérées, le rapport constant le long de l'ESP suggère que le produit est collecté uniformément lorsque les particules acquièrent une charge électrique suffisante au cours de leur progression. Inversement, pour des tensions plus élevées, un dépôt massif se produit à l'entrée dès que les particules sont suffisamment chargées.

Il ressort de la modélisation de ce précipitateur par la méthode des plans d'expériences, deux points importants à savoir:

- L'existence d'une influence importante des champs électriques sur la valeur du champ au centre de l'électrode de collection, ce qui se traduit par un pic de charge des particules dans la partie centrale de l'ESP.
- La forte corrélation existant entre la tension et le débit qui incite à bien choisir le réglage approprié.

# **Bibliographie**

---

## Bibliographie

- [1] H. Prouvost et C. Declercq, *Effets des particules en suspension sur la santé respiratoire des enfants ORS Nord*, Pas-de- Calais, 2007.
- [2] SCAL'Air, *Les particules en suspension pm polluant atmosphérique surveillé en Nouvelle-Calédonie : origines, impacts et surveillance*, Nouméa, Janvier 2015.
- [3] V. Pernelet-Joly, *La composition chimique des particules atmosphériques : quels composants participent à la nocivité des particules*, Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) Maisons-Alfort, Extrapol n° 35 - S.
- [4] A. Parif, *Synthèse des connaissances sur les particules en suspension dans l'air et des travaux d'air parif sur ces polluants*, Paris: Air Parif Pôle Etudes, Octobre 2008.
- [5] P. Camfil.. *Pm 1, Danger des particules fines pour la santé*, Université de Colombie britannique, Vancouver, canada , 2016.
- [6] D. Charpin, J. C. Pairon, I. Annesi-Maesano, D. Caillud, F. Blay, G. Dixsaut, B. Housset, J.-C. Meuriche, I. Roussel, D. Zmirou, P. Delaval et J.-C. Dalphin, *La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire. Document d'experts du groupe pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) de la Société de pneumologie de langue française (SPLF)*, 19 Mai 2016.
- [7] M. Abadie, *Thèse de doctorat. Contribution A L'étude De La Pollution Particulaire : Rôle Des Parois, Rôle De La Ventilation*, Laboratoire d'étude des phénomènes de transfert appliqués au bâtiment: Université de la Rochelle, septembre 2000.
- [8] Y. Yao, J. Pan, W. Wang, L. Zhixi, H. Kan, Y. Qiu, X. Meng et W. Wang, *Association of particulate matter pollution and case fatality rate of covid 19 in 49 Chinese cities*, Science of the Total Environment 741 (2020) 140396, 2020.
- [9] A. Altun Fidan et M. Kilic, *Utilization of electrostatic precipitators for healthy indoor environments. E3S Web of conference 111, 02020*, Clima 2019.
- [10] H. Priyamvada, K. Kumaragama, A. Chrzan, C. Athukorala, S. Sur et S. Dhaniyala, *Design and evaluation of a new electrostatic precipitation- based portable low-cost sampler for bioaerosol monitoring*, Journal of Aerosol Science and Technology,



- August 2020.
- [11] J. R. Buggisch, D. Gohler, D. Ing et A. Le Pape, *Experimental Model to Test Electrostatic Precipitation Technology in the COVID-19 Era : A Pilot Study*, Journal of the American college of Surgeons, August 2020.
- [12] O. Blanchard, F. Del Gratta, M. Durif, E. Frejafon et O. Le Bihan, *Exposition par inhalation aux aérosols. Principes et méthodes de mesures.*, Verneuil-en-Halatte : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2004.
- [13] K. Debrock, A. Cheymol et P. Vanderstraeten, *Observatoire des données de l'environnement*, Dep. Plan Air, Climat Et Energie. Laboratoire pour la recherche en environnement, juillet 2009.
- [14] J. Fontan, *Les pollutions de l'air, les connaître pour les combattre*, Paris: Edition Vuibert, 2003.
- [15] C. Seigneur, *Environnement atmosphérique et qualité de l'air. Cours*, France : Centre d'enseignement et de recherche en environnement atmosphérique, 2011.
- [16] P. Le Cloirec, *Les composés organiques volatils dans l'environnement*, Edition Lavoisier , 1998.
- [17] F. Kherbouche, *Thèse de doctorat. Étude expérimentale et numérique de la précipitation électrostatique d'une atmosphère chargée de pollutifon*, Université Djilali liabès Sidi Bel Abbès, 2017.
- [18] D. Dubois, *Thèse de Doctorat. Réalisation et caractérisation d'un réacteur plasma de laboratoire pour des études sur la dépollution des gaz d'échappement*, Université de Toulouse, 2006.
- [19] B. Dramane, *Thèse de doctorat. Précipitation Electrostatique De Particules Submicroniques Par Décharge A Barriere Diélectrique -Etude Electrique, Granulométrie Et Aérodynamique*, Université de Poitiers, 2009.
- [20] O. Molchanov, K. Krpec, J. Horak, L. Kubonova et F. Hopan, *Comparison of methods for evaluating particle charges in the electrostatic precipitation of fly ash from small scale solid fuel combustion*, Separation and Purification Technology 248 (2020) 117057, May 2020.
- [21] A. Izuno, *Electrostatic Precipitation*, Toyohashi University of Technology Aichi: Japan IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 7 No. 5,

- October 2000.
- [22] H. Pang, *Thèse de doctorat. Dépoussiérage électrostatique pour les particules submicroniques en atmosphère usuelle ( terre) et rarifiée (Planète Mars)*, Université Joseph Fourier Grenoble, Décembre 2006.
- [23] Y. Jiang et X. Yan, *Numerical investigation of the performance of electrostatic precipitators with wet rope array as collection electrodes*, Powder Technology 366 (2020) 337–347, February 2020.
- [24] Y. Wang, W. Gao, H. Zhang, C. Huang, K. Luo, C. Zheng et X. Gao, *Insights into the role of ionic wind in honeycomb electrostatic precipitators*, Journal of Aerosol Science 133 (2019) 83–95, 2019.
- [25] M. Pauthenier et M. Moreau-Hanot, *La charge des particules sphériques dans un champ ionisé*, J. Phys. Radium, pp 590-613, 1932.
- [26] L. Thang, *Numerical simulation of corona charging powder coating system*, Ontario London: department of electrical and computing engineering, August 1998.
- [27] S. Sander, S. Gawor et U. Fritsching, *Article in press. Separating polydisperse particles using electrostatic precipitators with wire and spiked-wire discharge electrode design*, Chinese Society of Particology and Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences. Published by Elsevier B.V, May 2017.
- [28] Wang, Yifan, W. Gao, H. Zhang, L. Shao, Z. Wu, D. Sun, C. Zheng et X. Gao, *Enhanced particle precipitation from flue gas containing ultrafine particles through precharging*, Process Safety and Environmental Protection 144 (2020) 111–122, July 2020.
- [29] C. Zheng, H. Whang, L. Xintao, Y. Wang, W. Gao, H. Zheng, D. Sun et X. Gao, *Effect of dust layer in electrostatic precipitators on discharge characteristics and particle removal*, Fuel 278 (2020) 118335, June 2020.
- [30] B. Benamar, *Thèse de doctorat. La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique*, Université Henri Poincaré, Nancy 1, novembre 2008.
- [31] A. Janne-Petteri Niemel, *Master's Thesis. Modeling of Particle Trajectories in an Electrostatic Precipitator (ESP) for Small-Scale Wood Combustion*, University of JYVÄSKYLÄ, Finland., March 2009.

- [32] S. Lachaud, *Thèse de doctorat. Décharge pointe – plan dans les mélanges gazeux correspondant aux effluents industriels: étude électrique et physico-chimique, application à la destruction du dioxyde d'azote*, Université de Toulouse France, 2002.
- [33] G. Lobov, *Master Thesis. Study of the corona discharge phenomenon for application in pathogen and narcotic detection in aerosol* Study of the corona discharge phenomenon for application in pathogen and narcotic detection in aerosol, Microsystem Technology, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, January 2012.
- [34] S. Souaki, *Thèse de doctorat. Optimisation des performances d'un procédé industriel d'électrofiltration alimenté par hautes puissances pulsées*, Université de PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR : École doctorale des sciences exactes et leurs applications , décembre 2016.
- [35] L. M. Dumitran, *Thèse de doctorat. Collection des fines particules dans un dipoussièreur électrostatique*, Université Joseph Fourier 1, Grenoble , Décembre 2001.
- [36] B. Khaddour, *Thèse de doctorat. Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée*, Institut national polytechnique de Grenoble, Novembre 2006.
- [37] K. Hak-joon, K. Jin-soon et H. Bangwoo, *Mist removal performance of a novel electrostatic precipitator type mist eliminator with a narrow gap at high velocity for coal-fired power plant*, EPC-0947, 2019.
- [38] A. Kasdi, Y. Zebboudj et H. Yala, *Simulation of Corona Discharge in DC Electrostatic Precipitator*, Journal of Electrical System 11-4 (2015) 384-396, 2015.
- [39] E. Jaroudi, I. Sretenovic, G. Evans et H. Tran, *Factors affecting particulate removal efficiency of kraft recovery boiler electrostatic precipitators: a technical review*, Vol 17. No 05. Tappi journal, May 2018.
- [40] <http://www.granuloshop.com>, *La granulométrie laser*, 78400 Chatou. France, 2021.
- [41] D. Blanchard, *Collecte des fines particules et caractérisation des couches de poussière dans un précipitateur électrostatique*, Université Joseph Fourier. Grenoble , Mars 2001.
- [42] P. Atten, H. Pang et J. Podlinski, *Collecte et dispersion de particules de fumée dans*

- 
- un électrofiltre*, Grenoble, SFE 2008.
- [43] K. Ohenoja, M. Korkko, V. Wigren, J. Osterbacka et M. Illikainen, *Fly ash classification efficiency of electrostatic precipitators in fluidized bed combustion of peat wood and forest residues*, *Journal of Environmental Management* 206 (2018) 607-614, October 2018.
- [44] C. Zheng, Z. Shen, Q. Chang, Q. Su, X. Zhu et X. Gao, *Experimental Study on Electrostatic Precipitation of Low-Resistivity High-Carbon Fly Ash at High Temperature*, *Energy and Fuels*, May 2017.
- [45] Comsol, *COMSOL Multiphysics User's Guide*, Version 5.5, 2021.
- [46] L. Qi, M. Liu, J. Wang et F. Zeng, *Inertial Separation of Particles Escaped from Electrostatic precipitators*, *Journal ACS Omega*, June 2021.
- [47] Y. Zhu, M. Gao, M. Chen, J. Shi et W. Shangguan, *Numerical simulation of capture process of fine particles in electrostatic precipitators under consideration of electrohydrodynamics flow*, *Powder Technology* 354 (2019) 653–675, June 2019.
- [48] P. Atten, H. Pang, J.-L. Reboud, J. Podlinski et J. Mizeraczyk, *Turbulence generation by charged fine particles in electrostatic precipitators*, *ESA Annual Meeting on Electrostatics*, 2007.
- [49] A. Jaworek, A. Marchewicz, A. Sobczyk et T. Czech, *Two-stage electrostatic precipitators for the reduction of PM 2.5 particle emission*, *Progress in Energy and Combustion Science* 67 (2018) 206-233, March 2018.
- [50] H. Bin, Y. Yang, L. Cai, Y. Zhulin, S. Roszak et Y. Linjun, *Experimental study on particles agglomeration by chemical and turbulent agglomeration before electrostatic precipitators*, *Powder Technology*, April 2018.
- [51] H. Sik Choi et J. Hwang, *Reduction of submicron-sized aerosols emission in electrostatic precipitation by electrical attraction with micron-sized aerosols*, *Powder Technology* 377 (2021) 882–889, 2021.
- [52] H. Y. Kyung, S. L. Joon et D. O. Myung, *Charging and Collection of Submicron Particles in Two- Stage Parallel-Plate Electrostatic Precipitators*, Elsevier Science Inc, *Aerosol Science and Technology* 27 308-323 (1997).
- [53] H. Said, H. Nouri et Y. Zebboudj, *Effect of Air Flow on Corona Discharge in Wire-to-Plate Electrostatic Precipitator*, *Journal of Electrostatics*, pp 1-7, 2014.
-

- 
- [54] H. Lei, L. Wang et Z. Wu, *EHD Turbulent Flow and Monte-Carlo Simulation for Particle Charging and Tracing in a Wire-Plate Electrostatic Precipitator*, Journal of Electrostatics 66, 130–141, 2008.
- [55] C. Zheng, X. Zhang, Z. Yang, C. Liang, Y. Guo, Y. Wang et X. Gao, *Numerical Simulation of Corona Discharge and Particle Transport Behaviour with the Particle Space Charge Effect*, Journal of Aerosol Science 118, 22–33., 2018.
- [56] J. Podlinski, A. Niezulis, J. Mizeraczyk et P. Atten, *ESP performance for various dust densities*, Journal of Electrostatics 66 (2008) 246-253: ELSEVIER, January 2008.
- [57] K. Adamiak et P. Atten, *Numerical Simulation of the 2-D Gas Flow Modified by the Action of Charged Fine Particles in a Single- Wire ESP*, April 2008.
- [58] Z. Yang, H. Li, Q. Li, R. Lin, Y. Jiang, Y. Yang, C. Zheng, D. Sun et X. Gao, *Correlations between particle collection behaviors and electrohydrodynamics flow characteristics in electrostatic precipitators*, Aerosol and Air Quality Research, 20: 2901–2910, 2020.
- [59] A.-R. Abdulmajeed, N. Kapur, J.-I. Summers et H.-M. Thompson, *Numerical modeling of electrohydrodynamic air flow induced in a wire to grid channel*, University of Leeds: ELSEVIER, 2017.
- [60] O. Alessandro Estarque et G. Vadila Giovana, *Efficiency of electrostatic precipitation of NiO nanoparticles dispersed by atomization*, Separation science and technology. Taylor and Francis, May 2019.
- [61] H. L. Clack, *Further consideration of gas-particle mass transfer simulation during electrostatic precipitator using lower order representations of particle size distributions : variable size distributions*, Journal of Electrostatics 104 (2020) 103418, January 2020.
- [62] B. Benamar, E. Favre, A. Donnot et M. Rigo, *Finite Element Solution for Ionized Fields in DC Electrostatic Precipitator*, Excerpt from Proceedings of the COMSOL Users Conference 2007 Grenoble.
- [63] D. Yan, Z. Zhang, H. Gong et Y. Ya, *Effect of barbed tubular electrode corona discharge EHD flow on submicron particle collection in a wide-type ESP*, Journal of electrostatics 109 (2021) 103545, January 2021.
-

- 
- [64] W. Gao, Y. Wang, H. Zhang, B. Guo, C. Zheng, J. Guo, X. Gao et A. Yu, *A Numerical Investigation of the Effect of Dust Layer on Particle Migration in an Electrostatic Precipitator*, *Journal of Aerosol and Air Quality Research*, 20: 166–179, 2020.
- [65] M. Gao, Y. Zhu, X. Yao, J. Shi et W. Shangguan, *Dust removal performance of two-stage electrostatic precipitators and its influencing factors*, *Powder Technology* 348 (2019) 13–23, March 2019.
- [66] S. Karpov et I. Krichtafovitch, *Electrohydrodynamic flow modeling using FEMLAB*, Excerpt from the proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference 2005 Boston.
- [67] F. Zhuangbo, L. Zhengwei et A. Kazimierz, *A Critical Review Of Models Used In Numerical Simulation Of Electrostatic Precipitators*, *IAPGOŚ* 4/2016, [DOI: 10.5604/01.3001.0009.5182].
- [68] P. Lawless et R. Altman, *Espm : an advanced electrostatic precipitator model*, In *IEEE Ind. Appl. 29th IAS Annual Meeting Denver*, 2-5 Octobre, pages 1519–1526, 1994.
- [69] C. Riehle, *Basic and theoretical operation of ESPs. Electrostatic precipitation.*, Chapman & Hall, London, 1997.
- [70] Z. Yang, Y. Cai, Q. Li, H. Li, Y. Jiang, R. Lin, C. Zheng, D. Sun et X. Gao, *Predicting particle collection performance of a wet electrostatic precipitator under varied conditions with artificial neural networks*, *Powder Technology* 377 (2021) 632-639, 2021.
- [71] M. Dong, F. Zhou, Y. Zhang, Y. Shang et S. Li, *Numerical study on fine-particle charging and transport behaviour in electrostatic precipitators*, *Journal of Powder Technology*, February 2018.
- [72] S. Li, Y. Huang, Q. Zheng, G. Deng et K. Yan, *A numerical model for predicting particle collection efficiency of electrostatic precipitators*, *Powder Technology* 347 (2019) 170–178, February 2019.
- [73] W. Gao, Y. Wang, H. Zhang, B. Guo, C. Zheng, J. Guo, X. Gao et A. Yu, *Numerical simulation of particle migration in electrostatic precipitator with different electrode configurations*, *Journal of Powder Technology*, August 2019.
-

- 
- [74] M. Pauthenier et R. Guillien, *Etude électromécanique de la charge limite d'une sphère conductrice dans un champ électrique ionisé*, Volume 195. C.R.A.S. Paris, 1932.
- [75] R. Cochet, *Loi de charge des fines particules submicroniques*, Colloque International N°102 : La physique des forces électrostatiques et leurs applications, C.N.R.S., Paris Références bibliographique.
- [76] J. Goupy, *Plans d'expériences pour surfaces de réponse*, Paris: Dunod, 1999.
- [77] J. Goupy, *La méthode des plans d'expériences. Optimisation du choix des essais et de l'interprétation des résultats*, Paris: Dunod, 1996.
- [78] D. Patiño, B. Crespo, J. Porteiro, E. Villaravid et E. Granada, *Experimental study of a tubular-type ESP for small-scale biomass boilers. Preliminary results in a diesel engine*, Powder Technology 288, 164–175, 2016.
- [79] C. Ruttanachot, Y. Tirawanichakul et P. Tekasakul, *Application of Electrostatic Precipitator in Collection of Smoke Aerosol Particles from Wood Combustion.*, Aerosol and Air Quality Research 11, 90–98, 2011.
- [80] S. Kim et K. Lee, *Experimental Study of Electrostatic Precipitator Performance and Comparison with Existing Theoretical Prediction Models*, Journal of Electrostatics 48, 3-25, 1999.
- [81] N. Kadous, F. Miloua et A. Tilmatine, *Particle distribution analysis along the collection electrode of a 'wire-to-cylinder' electrostatic precipitator*, DOI: 10.1080/00207233.2018.1560762: International Journal of Environmental Studies. Taylor and Francis Group, 2019.
- [82] S. Arif, D. Branken, R. Everson, H. Neomagus, L. le Grange et A. Arif, *CFD Modeling of Particle Charging and Collection in Electrostatic Precipitators.*, Journal of Electrostatics 84, 10-22, 2016.
- [83] H. J. White, *Particle Charging in Electrostatic Precipitator*, AIE&E Transactions 70, 1186-1191, 1951.

## Résumé

Le problème majeur des précipitateurs électrostatiques subsiste dans les particules submicroniques de diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$  et plus précisément dans la gamme inférieures à 0,7  $\mu\text{m}$ . Dans ce travail deux problèmes critiques ont été exposés, le premier consiste dans la taille des particules de la matière à filtrer, le second traite la répartition de la charge des particules le long du précipitateur. Dans un souci de différencier entre les deux problématiques, nous avons élaboré deux protocoles expérimentaux différents, le premier au sein du laboratoire APELEC de Sidi Bel Abbès et le deuxième au niveau du centre de recherche CNRS Grenoble – France. La procédure expérimentale proposée consiste à évaluer la distribution en taille des particules contenues dans différentes fumées (Cigarettes, encens) et aussi différentes poudres (calcite, cendres). Il a été démontré l'existence d'une hypothèse qu'on a nommé pendant toute cette thèse, hypothèse « agglomérations-dispersion ». En plus, une modélisation numérique de la trajectoire des particules a été effectuée pour la validation de l'hypothèse. Par ailleurs, un banc expérimental a été développé pour permettre l'estimation de la charge des particules à travers plusieurs sections constituant la longueur du précipitateur. Cette étude a été appuyée par une modélisation par la méthode des plans d'expériences.

## Abstract

The major problem of electrostatic precipitators remains in the submicron particle size range below 1  $\mu\text{m}$  and more precisely in the range below 0.7  $\mu\text{m}$ . In this work two critical problems have been exposed, the first one consists in the particle size of the material to be filtered, the second one deals with the charge distribution of the particles along the precipitator. In order to differentiate between the two problems, we have developed two different experimental protocols, the first at the APELEC laboratory in Sidi Bel Abbès and the second at the CNRS Grenoble research centre in France. The proposed experimental procedure consists in evaluating the size distribution of particles contained in different smokes (cigarettes, incense) and also different powders (calcite, ashes). It was demonstrated the existence of a hypothesis that has been named throughout this thesis, the "agglomeration-dispersion" hypothesis. In addition, a numerical modelling of the particle trajectory was carried out for the validation of the hypothesis. In addition, an experimental bench was developed to allow the estimation of the particle loading through several sections constituting the length of the precipitator. This study was supported by modelling using the design of experiments method.

## المخلص

تظل المشكلة الرئيسية للمرسبات الكهروستاتيكية في حجم الجسيمات دون الميكرون وبشكل أكثر دقة في النطاق أقل من 0.7 ميكرومتر. في هذا العمل تم طرح مشكلتين رئيسيتين، الأولى تتمثل في حجم الجسيمات للمادة المراد ترشيحها، والثانية تكمن في توزيع شحنة الجسيمات على طول المرسب. من أجل التفريق بين المشكلتين، قمنا بتطوير بروتوكولين تجريبيين مختلفين، الأول في مختبر APELEC في سيدي بلعباس والثاني في مركز الأبحاث CNRS في قرونوبل بفرنسا. يتمثل الإجراء التجريبي المقترح في تقييم توزيع حجم الجزيئات الموجودة في دخان مختلف (سجائر، بخور) وكذلك مساحيق مختلفة (كالسيت، رماد). تم إثبات وجود فرضية سميت خلال هذه الأطروحة بفرضية "التكتل والتشتت" لذلك أجريت نمذجة عددية لمسار الجسيمات للتحقق من صحة هذه الفرضية. بالإضافة إلى ذلك، تم تطوير منصة تجريبية نستطيع من خلالها قياس شحنة الجسيمات من خلال عدة أقسام تشكل طول المرسب. دعمنا هذه الدراسة بالنمذجة باستخدام أسلوب تصميم التجارب.